



Anton Ruohomäki

Hukan mittaaminen tahtituotannossa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 22.12.2019

Valvoja: Professori Olli Seppänen

Ohjaajat: Timo Valpola ja Oskari Peurakoski

Tekijä Anton Ruohomäki

Työn nimi Hukan mittaaminen tahtituotannossa

Maisteriohjelma Building Technology

Koodi CIV

Työn valvoja Professori Olli Seppänen

Työn ohjaajat Timo Valpola ja Oskari Peurakoski

Päivämäärä 22.12.2019

Sivumäärä 68 + 2

Kieli suomi

Tiivistelmä

Rakentamisen teollisuudenalaa on viime vuosina kritisoitu julkisesti sen heikosta tuottavuudesta. Lean-rakentamista on esitetty keinona ratkaista huonoon tuottavuuteen liittyviä ongelmia. Lean-rakentamisen ydinajatuksena on tehostaa tuotantoa poistamalla siitä arvoa tuottamattomia tehtäviä, eli hukkaa. Tahtituotannolla, joka pohjautuu myös Lean-filosofiaan, on saavutettu mittavia säästöjä rakennushankkeiden läpimenoajoissa, mutta hukkaa tahtituotannossa ei ole vielä juurikaan tutkittu.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää tahtituotannon potentiaali hukan vähentämisessä rakennustyömaalla. Mittaamalla tahtituotannossa esiintyvää hukkaa ja vertaamalla tuloksia aiemmin tehtyihin tutkimuksiin, jotka tarkastelevat hukkaa rakennustyömailla, joissa ei ole käytetty tahtituotantoa, voidaan muodostaa käsitys tahtituotannon potentiaalista hukan vähentäjänä. Tutkimuksessa pyrittiin myös pääsemään käsiksi syihin, joista tuotannossa ilmenevät poikkeamat johtuvat.

Diplomityö toteutettiin kahtena erillisenä tapaustutkimuksena. Ensimmäinen osuus oli monitapaustutkimus, jonka tapauksina olivat case-kohteen kaksi erillistä taloa, joista toinen toteutettiin tahtituotannolla ja toinen perinteisin menetelmin. Talojen sisätyövaiheiden aikatauluja vertailtiin kirjallisuuskatsauksessa tunnistetuin menetelmin ja arvioitiin aikatauluissa olevaa hukkaa. Toisessa tapaustutkimuksessa tapauksena oli case-kohteen tahtituotannolla toteutettava talo. Tässä tapaustutkimuksessa aineistoa kerättiin video-kuvaamalla kahta hotellihuonetta, eli tahtialuetta, kahden viikon ajan, tehden samalla systemaattista havainnointia. Tällä aineistonkeruumenetelmällä kerättiin dataa, josta voitiin analysoida tahtialueiden toteutunut käyttöaste ja samalla päästiin käsiksi syihin, joista poikkeamat suunnitellun ja toteutuneen tuotannon välillä johtuivat.

Tutkimuksessa havaittiin, että tahtituotannolla pystytään vähentämään tyhjän tilan muodossa olevaa hukkaa poistamalla tarpeetonta keskeneräisen työn kertymää (WIP) sekä yksittäisten työvaiheiden sisältä, että eri työvaiheiden väliltä. Keskeneräisen työn kertymällä tarkoitetaan työn alla olevien, keskeneräisten, huoneiden määrää. Sen poistaminen tapahtuu pienentämällä tuotannossa käytettävää eräkokoa ja tahdistamalla työvaiheet etenemään samalla nopeudella tahtialueelta toiselle, mikä mahdollistaa kiinteiden tila- ja aikapuskureiden minimoinnin. Tutkimuksen tuloksista kävi kuitenkin myös ilmi, että työmaalla oli suuri määrä tarpeettomana liikkeenä ilmenevää hukkaa. Kahdessa, noin 20 m² kokoisessa hotellihuoneessa käytiin kymmenen päivän mittausjakson aikana yhteensä 1590 kertaa, mikä tarkoittaa 79,5 kertaa työpäivää kohden. Tuotteen virtauksen parantuksessa, tulee työn virtauksesta alttiimpi häiriöille. Mikäli tahtiohjaus on puutteellista ja työtehtävien varamestoja ei ole määritetty, hukkaa ilmenee työn virtauksessa.

Avainsanat rakentamistalous, hukka, tahtituotanto, hukan mittaaminen, virtaus



Author Anton Ruohomäki		
Title of thesis Measuring waste in Takt Time production		
Master programme Building Technology		Code CIV
Thesis supervisor Prof. Olli Seppänen		
Thesis advisors Timo Valpola, Oskari Peurakoski		
Date 22.12.2019	Number of pages 68 + 2	Language Finnish

Abstract

The construction industry has been under public criticism during recent years, because of low productivity. Lean construction is presented as a potential solution to solve the problems related to the low productivity. Lean construction is based on accelerating the production by eliminating the non-value adding elements from production, in the other words: waste. Takt Time production, which is also based on Lean philosophy, has gained significant reduces in the project's lead-time, but waste in Takt Time production is still unresearched topic.

This study aimed to figure out the potential of Takt Time production as a waste reducer in the construction site. By measuring the waste in Takt Time production and comparing the results to the earlier studies, which are measuring the waste in construction sites without Takt Time production, it is possible to prove the potential of Takt Time production as a waste reducer. This study also strives to find out the reasons behind the deviations in the production.

The study was carried out as two different case studies. The first case study was multiple case study, where cases were two different buildings from the same construction project, where one building was executed with Takt Time production and the other without Takt Time production. This multiple case study compares the schedules of two different buildings with the methods learned from previous studies and the amount of waste in the schedule was analyzed. In the second case study, case was building which was executed with Takt Time production. Data was collected by recording video for two weeks from two different Takt areas and simultaneously directly observing the working. With collected data it was possible to analyze the utilization rates of the Takt areas and figure out the deviations in the production, which led to the differentiations between planned and fulfilled schedule.

In the study it was found, that with Takt Time production it is possible to reduce the waste which shows up as an empty space. This happens by reducing unnecessary WIP from inside of the tasks and from in between the tasks. Takt Time production does this by reducing the batch size and by levelling the durations of the tasks, which allows the minimization of solid time- and space buffers. However, results of the study showed up that there was lot of waste in the form of unnecessary movement in the Takt areas. During the ten days recording, there were 1590 enterings in the two recorded Takt areas in total, which means the average amount of enterings was 79.5 times per day in one 20 m²-sized Takt area. When the product flow was improved, the work flow was more vulnerable to disturbances. If the Takt control is defective or the workable backlogs are not defined, appears that as a waste in the work flow.

Keywords construction management, waste, takt, waste measurement, flow

Alkusanat

Oma mielenkiintoni rakentamisen tuotannon optimointiin syntyi yliopiston rakentamistalouden kurssien sekä Rakentamistalouden kerho - ROPO ry:n toiminnan kautta. Tähän aihepiiriin sopivaa diplomityön aihetta kehitellessä pinnalle nousi kohdeyrityksen, NCC Suomi Oy:n, tunnistama ongelma: tilat ovat työmaalla tyhjillään suurimman osan ajasta. Samanaikaisesti käynnissä olleen, Aalto-yliopiston koordinoiman, Building 2030 –kon-sortion yhtenä vuosittaisista tutkimusteemoista oli hukka suunnittelussa ja tuotannossa, mikä teki aiheesta myös tiedeyhteisön näkökulmasta ajankohtaisen.

Tutkimus päätettiin kunnianhimoisesti toteuttaa tutkimalla käynnistymässä olevaa koh-deyrityksen tahtituotannon pilottikohdetta, jotta tutkimuksessa onnistuttaisiin luomaan käsitys tahtituotannon suhteesta työmaalla esiintyvään hukkaan. Tahtituotannon imple-mentoinnissa ilmenneet haasteet saivat diplomityön toteuttamisen tuntumaan ajoittain jopa mahdottomalta. Haluankin kiittää Vallila Folks Hotellin työmaan toimihenkilöitä ja diplomityön ohjaajia Timo Valpolaa sekä Oskari Peurakoskea, että jaksoitte uskoa dip-lomityöni suorittamiseen nykyisessä muodossaan ja että tahtituotannon implementoin-nissa ei luovutettu, haasteista huolimatta.

Haluan myös kiittää työn valvojaa Professori Olli Seppästä aktiivisesta työn ohjauksesta sekä Vison Oy:n Aleksi Heinosta sparrauksesta tahtituotannon syvempään ymmärtämi-seen. Lisäksi haluan kiittää perhettäni, Pasi Järvistä ryhmineen sekä Casserlyn poikia jatkuvasta tuesta ja kannustuksesta. Lopuksi haluan kiittää avopuolisoani Tiinaa, joka uskonut minuun ja tukenut minua koko tutkintotaipaleeni ajan.

Espoossa 22.12.2019

Anton Ruohomäki

Anton Ruohomäki

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	3
1.4	Työn rakenne ja rajaukset.....	4
2	Ongelmat nykyrakentamisessa	6
3	Lean rakentamisessa	8
3.1	Lean-filosofian tausta	8
3.2	Lean-rakentaminen.....	8
3.3	Virtaus ja vaihtelevuus	9
4	Hukka.....	16
4.1	Hukan määritelmät	16
4.2	Hukan eri muodot.....	16
4.3	WIP.....	17
4.4	Hukan mittaaminen	19
5	Tahtituotanto	23
5.1	Tahtituotannon tausta	23
5.2	Tahtisuunnittelu	23
5.3	Tahtiohjaus	24
5.4	Tahtituotannon hyödyt	25
5.5	Hukka tahtituotannossa	26
6	Kirjallisuuskatsauksen yhteenveto	29
7	Empiirinen tutkimus	32
7.1	Tutkimusmenetelmät.....	32
7.2	Tutkittavat aiheet ja hypoteesit	33
7.3	Datan keruun toteuttaminen.....	34
7.4	Case: Vallila Folks Hotel.....	37
7.5	Tulokset	41
7.5.1	Aikataulujen vertailu	41
7.5.2	Mestakamerat.....	43
7.5.3	Systemaattinen havainnointi	49
8	Yhteenveto ja pohdinta	52
8.1	Tulosten arviointi ja pohdinta	52
8.2	Tutkimuksen tieteellisen kontribuution arviointi.....	57
8.3	Tutkimuksen kontribuutio alan yritysten näkökulmasta	58
8.4	Tutkimuksen luotettavuuden arviointi.....	59
9	Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet	61
	Lähdeluettelo.....	63
	Liiteluettelo	
	Liitteet	

Lyhenteet

BLE	Langaton tietoliikennetekniikka, Bluetooth Low Energy
hh	Hotellihuone
IGLC	Kansainvälinen Lean-rakentamisen ryhmä
JOT	Juuri oikeaan tarpeeseen, englanniksi just-in-time
KPI	Suorituskykymittari, Key Performance Indicator
KVR	Kokonaisvastuurakentaminen
LBMS	Sijaintipohjainen aikataulutusmenetelmä
TPS	Toyotan luoma tuotantomalli, Toyota Production System
WIP	Keskeneräisen työn kertymä, Work In Progress

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Suomessa rakentamisen osuus bruttokansantuotteesta on noin 6 % (Rakennusteollisuus RT ry 2019). Rakentamisen tuottavuuden parantamisella voisi siis olla positiivisia vaikutuksia koko maan talouteen. Rakentamisen työn tuottavuus on Suomessa, niin kuin muissakin maissa, selvästi muita teollisuuden aloja jäljessä. Työn kustannukset muodostavat suuren osan rakentamisen kokonaiskustannuksista, jonka vuoksi rakentamisen työn tuottavuuden parantaminen on herättänyt suurta mielenkiintoa. (Koskenvesa et al. 2010.) Suomen rakentamisen heikkoa tuottavuutta on kritisoitu viime vuosina paljon uutisotsikoissa:

Rakennuslehti, 9/2017: *''Rakennuslalla työn tuottavuus ei ole kasvanut 40 vuodessa – onko allianssista tai leanista apua?''*

Kauppalehti, 4/2018: *''Rakentamisen surkealle tuottavuudelle selitys – Professori: ''Työajasta vain 30 prosenttia tuottavaan työhön''*

Talouselämä, 6/2018: *''Rakennustyömailla 80 prosenttia työajasta on yhä odottelua''*

Julkinen kriittisyys alan tuottavuutta kohtaan sekä alan kuumentunut markkinatilanne on pakottanut alan yritykset pohtimaan omaa tuottavuuttaan. Toyotan autotehtaalta alkunsa saanutta Lean-filosofiaa on hyödynnetty rakennuslalla merkittävin tuloksin ja Lean-rakentamisesta on muodostunut vakiintunut termi. Lean-rakentamista onkin esitetty yrityksille yhtenä keinona ratkaista huonoon tuottavuuteen ja hukkaan liittyviä ongelmia (Koskela et al. 2002).

Lean-filosofian mukaisesti tuottavuutta voidaan parantaa vähentämällä hukkaa (Koskela et al. 2002). Hukalla tarkoitetaan rakennustyömaalla työtä tai työhön liittyvää toimintaa, joka ei lisää tuotteen, eli rakennuksen arvoa (Forsberg & Saukkoriipi 2007). Esimerkiksi listoitaja tekee arvoa tuottavaa työtä asentaessaan listan, mutta kaikki muu kuten listojen sahaus, materiaalien siirtely, työkalujen etsintä ja siirtyminen työpisteiden välillä on hukkaa. Hukkaa on myös tekijää odottavat tai varastoalueina toimivat työpisteet, eli mestat. Tuottavuutta, kuten kaikkea toimintaa, voidaan systemaattisesti kehittää vasta, kun sitä mitataan. Mittaamalla saadaan muodostettua todellinen tilannekuva nykyhetkestä. Tulosten analysoinnin ja parannuskohtien tunnistamisen jälkeen voidaan tehdä korjaustoimenpiteitä toimintaan, joiden jälkeinen mittaus kertoo toimenpiteiden vaikutuksen. Sama periaate pätee myös hukkaan. Hukan mittaamisen tavoitteena on tuottaa informaatiota nykytilasta, jotta nykytilannetta voidaan parantaa (Koskela et al. 2002).

Käyttämällä tahtituotantoa ollaan saatu tehostettua rakennustyömaiden toimintaa, mikä on mahdollistanut lyhennyksiä rakennushankkeiden läpimenoajoissa (mm. Frandson & Tommelein 2014; Faloughi et al. 2015; Haghsheno et al. 2016). Tahtituotanto on Lean-filosofiaan perustuva menetelmä, mikä rakentamiseen sovellettuna tarkoittaa sitä, että jokainen työvaihe on aikataulutettu etenemään samalla vauhdilla mestalta toiselle, noudattaen ennalta määrättyä etenemisjärjestystä (Faloughi et al. 2015). Rakennustyömailla ilmenevää hukkaa on tutkittu erilaisin menetelmin (mm. Forsberg & Saukkoriipi 2007; Kalsas 2013; Zhao et al. 2019), mutta hukkaa tahtituotannossa käsitteleviä tutkimuksia ei ole vielä juurikaan tehty.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on tarkastella Lean-rakentamisen yhden metodin, tahtituotannon, potentiaalia hukan vähentämisessä rakentamisen tuotannossa. Rakentamisen tuotanto voidaan kuvata työn ja tuotteen virtauksena. Työn virtauksella tarkoitetaan yksittäisen työntekijän siirtymistä työpisteeltä toiselle ja tuotteen virtauksella tarkoitetaan työvaiheiden virtausta yhden tuotteen, eli esimerkiksi huoneen läpi. Virtauksen esitetään olevan sitä parempi, mitä vähemmän siinä on arvoa tuottamattomia elementtejä, eli hukkaa. (Sacks et al. 2017.) Tarkastelemalla tahtituotannon työn ja tuotteen virtauksissa sijaitsevaa hukkaa, voidaan luoda kokonaiskuva tahtituotannolla toteutettavan työmaan tuotannossa ilmenevistä hukista. Kokonaiskuvan avulla voidaan muodostaa käsitys tahtituotannon potentiaalista hukan vähentäjänä rakentamisen tuotannossa.

Tähän tavoitteeseen päästään vastaamalla kolmeen tutkimuskysymykseen:

TK 1: *Miten tahtituotannolla voidaan vähentää hukkaa työmaalla?*

Työn kirjallisuusselvityksessä pyritään kirjallisuuden perusteella selvittämään, miten tahtituotannolla voidaan vaikuttaa hukan määrään työmaalla. On esitetty, että tahtituotannolla voitaisiin vähentää työmaalla esiintyvää hukkaa (Vatne & Drevland 2016), mutta syitä hukan vähenemiselle ei ole selvitetty. Tutkimalla miten ja mitä hukkia tahtituotannon avulla voidaan vähentää, täydennetään tahtimenetelmän hyötyjen kokonaiskuvaa, mikä auttaa tahtituotannon käyttäjiä ja käyttöä harkitsevia soveltamaan ja kehittämään tahtituotantoa tulevaisuudessa.

TK 2: *Miten tahtituotanto vaikuttaa tuotteen virtaukseen?*

Työssä pyritään muodostamaan realistinen tilannekuva hukan määrästä tyhjillään olevan mestan muodossa. Edellytyksenä arvoa tuottavalle työlle on, että työntekijä on läsnä mestalla (Zhao et al. 2019). Mestän käyttöaste kertoo ajan, jolloin työntekijä on ollut työpisteellä, eli ajan jolloin arvoa tuottavaa työtä on ollut kyseisessä mestassa mahdollista tehdä. Tuotteen virtauksessa ilmenevä hukka, on hukkaa, jossa tuote odottaa arvoa tuottavaa työtä. Tahtituotannon nähdään priorisoivan tyhjän mestan muodossa olevan hukan minimoimista, eli hukan, jossa työ odottaa työntekijää (Faloughi et al. 2015). Tämän hukkatyyppin minimoimisella onkin nähty olevan suuri potentiaali rakennustuotannon tehostamisessa (Faloughi et al. 2015; Sacks 2016; Sacks et al. 2017). Tutkimalla mestojen käyttöastetta päästään käsiksi tahtituotannon potentiaaliin vähentää tuotteen virtauksessa sijaitsevaa hukkaa.

TK 3: *Miten tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen?*

Hukkaa ilmenee työmaalla myös työn virtauksessa, joten siinä ilmenevien hukkien tarkastelematta jättäminen estäisi muodostamasta kokonaiskuvaa tahtituotannosta työmaan hukan vähentäjänä. Faloughi et al. (2015) perusteella tahtituotannolla toimivalle työmaalle voidaan olettaa parempaa tuotteen virtausta kuin työmaalle, joka toimii ilman tahtituotantoa, mutta tahtituotannon vaikutuksista työn virtaukseen ei ole otettu kantaa. Tämän vuoksi on tärkeää pyrkiä selvittämään, miten tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen.

Näillä tutkimuskysymyksillä pyritään yhtenäisenä kokonaisuutena selvittämään tahtiaikataulun potentiaalia hukan vähentämisessä rakennustyömaalla. Tavoitteena on selvittää tahtiaikataulun teoreettiset keinot hukan vähentämiseen ja tunnistaa tahtiaikataulun vaikutus sekä tuotteen että työn virtauksessa sijaitseviin hukkiin.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmät ovat valittu tutkimuskysymysten mukaan. Tutkimuskysymykset eroavat luonteeltaan toisistaan ensimmäisen tutkimuskysymyksen ollen laadullista, eli kvalitatiivista ongelmaa esittävä tutkimuskysymys, ja toisen sekä kolmannen tutkimuskysymyksen lukeutuen sekä laadullisen että määrälliseen, eli kvantitatiivisen tutkimuksen piiriin. Laadullista ja määrällistä tutkimusmenetelmää voidaan yhdistää käyttäen tutkimuksessa niin kutsuttua triangulaatiota, monimetodista lähestymistapaa. Yhdistäessä sekä laadullisen että määrällisen tutkimusmetodin on kyse tarkemmin ottaen menetelmätriangulaatiosta. (Vilkkä 2005.)

Tutkimuksen tutkimusstrategiaksi on valittu tapaustutkimus. Tapaustutkimukseksi luokitellaan tutkimusote, lähestymistapa tai näkökulma, jota käytetään todellisuuden tutkimiseen, jossa tutkimuksen kohteeksi valitaan tavallisesti yksi tai tarvittaessa useampi tapaus (Vilkkä 2005). Tutkimusstrategiana tapaustutkimusta käytetään yleensä tutkimuskysymyksen ollessa muodossa: *miten* tai *miksi*, kun tutkija ei juurikaan pysty vaikuttamaan tapahtumiin ja kun tavoitteena on tutkia nykyaikaisia ilmiöitä tosielämän kontekstissa (Yin 2009). Tutkimuksen tavoitteena on tutkia tahtituotannon potentiaalia hukan vähentäjänä työmaalla, jolloin ilmiön, eli tahtituotannossa ilmenevän hukan, kartoittaminen olemassa olevasta tahtikohteesta on avainasemassa. Tähän tavoitteeseen pyritään pääsemään kolmella *miten*-muodossa olevalla tutkimuskysymyksellä. Diplomityöntekijä on diplomityötä tehdessään projektista riippumaton tutkija, jolloin tutkijan vaikutusmahdollisuudet tapahtumiin ovat vähäiset. Näiden seikkojen pohjalta tapaustutkimus valikoitui tutkimuksen tutkimusstrategiaksi.

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen pyritään vastaamaan kirjallisuuskatsauksessa kerätyn aineiston ja siitä esitettyjen johtopäätösten pohjalta käyttäen hermeneuttista tutkimusotetta. Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä toimiva: *Miten tahtituotannolla voidaan vähentää hukkaa työmaalla?* pyrkii paljastamaan merkityssuhteen tahtituotannon ja hukan vähentämisen välillä. Hermeneuttista metodia käytetäänkin juuri merkitysten paljastamiseen ja siksi se on varsin yleinen tutkimusote laadullisella tutkimusmenetelmällä toteutettavissa tutkimuksissa. Hermeneuttinen kehä kuvaa hyvin hermeneuttista metodia. Hermeneuttisella kehällä tarkoitetaan tutkijan jatkuvaa käsityksen laajentumista tutkimuksen edetessä. Tutkija on jatkuvassa vuoropuhelussa aineistonsa kanssa ja tulkitsee vaihteittain aineistoaan tutkimusongelmaan peilaten. Jokaisessa tulkintavaiheessa tutkijan tekemän tulkinnan tulisi korjaantua ja syventyä. (Vilkkä 2005.) Hermeneuttinen kehä muodostetaan kirjallisuuskatsauksessa tekemällä vaihteittaisia, tulkinnallisia yhteenvetoja käsitellyn aiheen peilautumisesta tutkimuskysymykseen. Ensimmäisen tulkinnan jälkeen edellistä tulkintaa käytetään lähtökohtana seuraavan tulkinnan tekemiseen, jota pyritään uudella tiedolla korjaamaan ja syventämään. Tätä kirjallisuuskatsauksessa muodostettua käsitystä pyritään empiirisesti testaamaan monitapaustutkimuksella, jossa vertaillaan tahtituotannolla tehtävän talon ja perinteisesti toteutettavan talon aikatauluja.

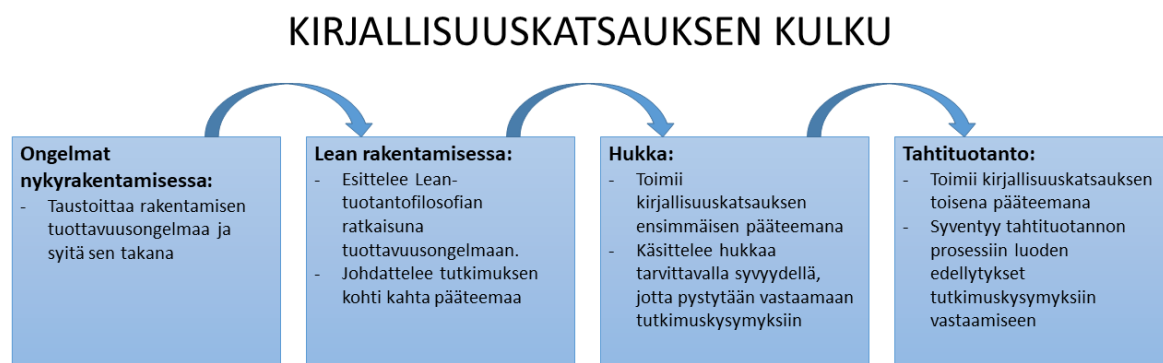
Toisen tutkimuskysymyksen: *Miten tahtituotanto vaikuttaa tuotteen virtaukseen?* ollessa sekä laadullisen että määrällisen tutkimuksen piiriin kuuluva tutkimuskysymys, käytetään tähän tutkimuskysymykseen vastaamiseen laadullista, eli kvalitatiivista sekä määrällistä, eli kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Tutkimus toteutetaan yksittäisenä tapaustutkimuksena. Tapaustutkimuksen aineisto kerätään määrälliselle tutkimusmenetelmälle tyypillisellä systemaattisella havainnoinnilla. Systemaattisia havaintoja voidaan kerätä esimerkiksi aistein tai automaattisilla havainnointilaitteilla. (Vilkkä 2007).

Kolmas tutkimuskysymys: *Miten tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen?* on myös sekä laadullisin että määrällisin tutkimusmenetelmin selvitettävissä oleva tutkimuskysymys. Tähän tutkimuskysymykseen vastataan tekemällä systemaattista havainnointia rinnan toiseen tutkimuskysymykseen vastaavan tapaustutkimuksen kanssa. Havainnointi on valittu, koska tarkoituksena on selvittää, mitä tapahtuu, kun mestalla ei työskennellä. Havainnoinnin avulla on mahdollista selvittää, mitä todella tapahtuu, kun taas kyselyiden ja haastattelujen avulla saadaan selville, mitä henkilöt ajattelevat, tuntevat ja uskovat (Hirsjärvi et al. 2000). Systemaattinen havainnointi sopii tilanteeseen, jossa havainnoija on ulkopuolinen toimija, kun taas osallistuvan havainnoinnin vaatimuksena on, että havainnoija osallistuu ryhmän toimintaan (Hirsjärvi et al. 2000).

1.4 Työn rakenne ja rajaukset

Tämä diplomityö koostuu johdannosta, kirjallisuuskatsauksesta, empiirisen tutkimuksen osuudesta, yhteenvedosta ja pohdinnoista sekä johtopäätöksistä ja jatkotutkimusehdotuksista. Johdannossa esitellään työn taustaa, tavoitteita ja tutkimuksessa käytettäviä tutkimusmenetelmiä. Kirjallisuuskatsaus koostuu viidestä luvusta: Ongelmat nykyrakentamisessa, Lean rakentamisessa, Hukka, Tahtituotanto ja Kirjallisuuskatsauksen yhteenvedo. Luvussa Ongelmat nykyrakentamisessa syvennyttään tutkimuksen taustoissa esiin nostettuun rakentamisen tuottavuusongelmaan kirjallisuuden avulla. Tässä luvussa pyritään avaamaan syitä rakentamisen huonon tuottavuuden takana. Luvussa Lean rakentamisessa esitellään Lean-filosofiaa ratkaisuvaihtoehtona huonoon tuottavuuteen. Tässä luvussa avataan Lean-filosofian taustaa ja sen käyttöä rakentamisessa aiheeseen liittyvän kirjallisuuden avulla. Luvussa Hukka paneudutaan hukan käsitteeseen, sen ilmenemiseen rakentamisessa sekä sen mittaamiseen. Hukan minimointi on Lean-rakentamisen ydinajatus, joten sen käsittely muodostaa loogisen jatkumon kirjallisuuskatsaukselle. Hukan käsitettä ja sen ilmenemistä rakentamisessa käsitellään kirjallisuuteen avulla ja sen mittaamista rakentamisessa tarkastellaan aiemmin tehtyjen, hukkaa mittaavien tutkimusten perusteella. Luvussa Tahtituotanto esitellään tahtituotantoa yhtenä Lean-rakentamisen metodina. Luvussa käydään läpi tahtituotannon taustaa, tahtisuunnittelua, tahtiohjausta, tahtituotannolla saavutettuja hyötyjä sekä hukan ilmenemistä tahtituotannossa.

Kirjallisuuskatsauksessa taustoitetaan pääteemoja, sekä syvennyttään tutkimusongelman kannalta oleellisiin aiheisiin. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on luoda kirjallisuuden pohjalta käsitys tahtituotannon suhteesta hukkaan, mikä toimii hypoteesina diplomityön empiirisessä osuudessa. Kirjallisuuskatsauksen etenemisen logiikkaa on avattu kuvassa 1.



Kuva 1 Kirjallisuuskatsauksen eteneminen

Empiirisessä osuudessa esitellään tutkittava aihe ja käytettävät tutkimusmenetelmät, luodaan hypoteesit empiiriselle tutkimukselle kirjallisuuskatsauksen pohjalta, esitellään tutkittava case-kohde sekä lopuksi esitetään tutkimuksen tulokset. Yhteenvedossa ja pohdinnoissa arvioidaan ja pohditaan saatuja tuloksia peilaamalla niitä kirjallisuuteen. Tässä luvussa arvioidaan myös tutkimuksen kontribuutiota sekä tieteellisestä että alan yritysten näkökulmasta, tutkimuksen luotettavuutta sekä otetaan kriittisesti kantaa tutkimuksen rajoitteisiin ja mahdollisten virheiden ilmenemiseen. Yhteenvedossa ja jatkotutkimusehdotuksissa pyritään vastamaan ytimekkäästi tulosten ja pohdintojen pohjalta tutkimuskysymyksiin sekä annetaan ehdotuksia jatkotutkimusaiheista.

Tutkimuksen kirjallisuuden lähteinä on käytetty pääasiassa kansainvälisiä tieteellisiä artikkeleja ja konferenssijulkaisuja. Tutkimus on rajattu koskemaan rakennustuotannossa työmaalla ilmenevää hukkaa, eikä ota kantaa rakentamisen sidosryhmissä, kuten toimitusketjuissa tai suunnittelussa ilmenevään hukkaan. Kirjallisuuskatsauksessa on kuitenkin haettu vaikutteita muiltakin teollisuuden aloilta kuin rakentamisen teollisuuden alalta, kuten valmistavasta teollisuudesta.

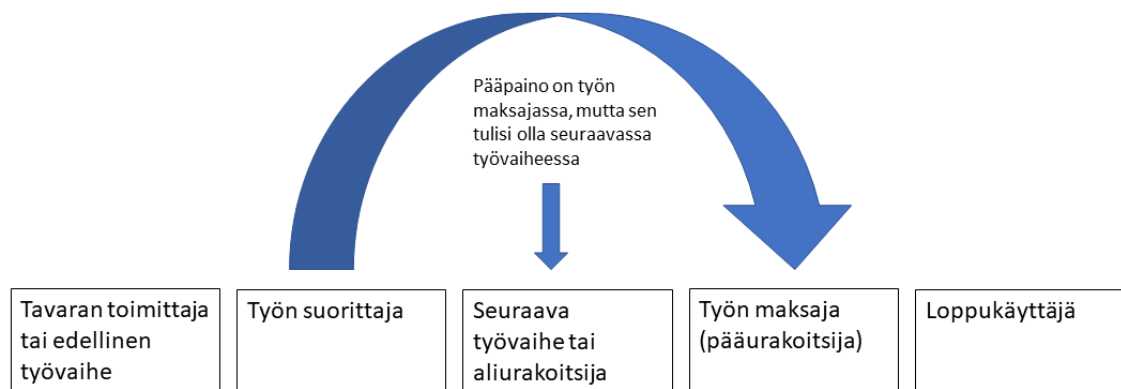
2 Ongelmat nykyrakentamisessa

Nykyrakentamisen johtamista on kritisoitu monissa tutkimuksissa (mm. Koskela et al. 2002; Bertelsen et al. 2006; Koskenvesa et al. 2010; Binninger et al. 2016). Rakennusprojektien johtamista hankaloittaa se, että ne ovat nykyään monimutkaisia sekä uniikkeja. Monimutkaisia projekteja on yritetty selkeyttää sillä, että projekti pilkotaan heti alussa yksittäisiin työsuoritteisiin, joita optimoidaan erillisinä kokonaisuuksina sekä ajallisessa että rahallisessa mielessä. Rakennustuotanto nähdään näin vain tuotosten ja panosten suhteena, mikä on ajanut yksittäisten työsuoritusten optimointiin, sen sijaan, että optimoitaisiin koko projektia. Jokainen työvaihe pakotetaan alkamaan aikaisimpana mahdollisena ajankohtana, jolloin tuotanto on niin sanotusti työntöohjattua. (Koskela et al. 2002.) Yksittäiset urakoitsijat toimivat erillisinä toimijoina ja optimoivat omaa työsuoritustaan huomioimatta muita urakoitsijoita, mikä johtaa harvoin koko projektin kannalta parhaaseen lopputulokseen. (Binninger et al. 2016.) Työn suorittajat, eli usein aliurakoitsijat, ovat pitkälle erikoistuneita työssään ja työnkuva on voimakkaasti rajoittunut. Esimerkiksi Ruotsissa on havaittu, että erikoistumisaloilla ammattilajeihin on ollut suuri vaikutus tuotantoprosessiin. Erikoistumisaloista johtuen tuotantoprosessista on tullut joustamaton, koska eri ammattilajien edustajat eivät ole halukkaita tekemään yhteistyötä toisten urakoitsijoiden kanssa. (Forsberg & Saukkoriipi 2007.) Kun aliurakoitsijat ovat pitkälle erikoistuneita ammattilajeihinsa, työkuormien tasaaminen urakoitsijoiden kesken hankaloituu huomattavasti (Salem et al. 2018).

Toinen aihe, jota aiemmin tehdyissä tutkimuksissa kritisoidaan, on projektin ja työsuoritteiden aikataulun ohjaus nykyrakentamisessa. Projektin ohjaus ja työtehtävien etenemien seuranta tapahtuvat yleensä reaktiivisesti (Koskela et al. 2002). Aikataulun ohjausta tapahtuu siis vasta, kun tuotannossa havaitaan ongelmia. Ongelmia tulisi tämän sijaan tunnistaa ja ratkaista proaktiivisesti, ennen kuin se on varsinaisesti aiheuttanut häiriötä tuotannossa. (Ezzeddine et al. 2019.) Nykyrakentamisessa projektia pyritään ohjamaan tarkastelemalla aiempien viikkojen toteumia ja havaitsemalla niissä poikkeamia. Projektin ohjaus toimiikin ikään kuin termostaatin tavoin: kun ollaan myöhässä, hankitaan työmaalle lisää työntekijöitä, mikä vaikuttaa negatiivisesti tuottavuuteen. (Koskela et al. 2002.) Projektin aikataulua ohjataan usein myös siirtämällä työsuoritteiden aloitus- sekä lopetuspäiviä ja arvioimalla jäljellä olevan työsuoritteen kesto. Tällä ohjaustavalla tuotannon virtaus, tuottavuus ja hukka jäävät kokonaan huomioimatta. (Koskenvesa et al. 2010.) Työn virtauksen ja arvionluonnin näkökulma jää puuttumaan työsuoritteiden johtamisesta myös, koska työtehtävien seuranta tapahtuu toteumien mukaan, jolloin edes yksittäisten työtehtävien johtaminen ei usein onnistu. Työnjohtajille on yleensä määritetty omat vastuualueensa, mikä ajaa heidät helposti tekemään toimenpiteitä, jotka tehostavat heidän oman vastuualueensa toimintaa, mutta heikentävät koko projektin tehokkuutta. (Koskela et al. 2002.)

Nykyrakentamisen yhdeksi ongelmaksi on tunnistettu myös työtehtävien valmiiksi saattamisen laiminlyönti. Salem et al. (2018) kuvaavat ongelmaksi liiallisen keskittymisen työtehtävien aloitukseen ja työtehtävien valmiiksi saattaminen jää huomiotta. Tällöin työvaiheen viimeiset työsuoritteet jäävät roikkumaan työlistalle pitkiksi ajoiksi. Nämä tekemättä jäävät työt eivät ole kyseisen, työtä suorittavan aliurakoitsijan kannalta välttämättömiä töitä tehdä, jotta he voivat siirtyä seuraavalle työpisteelle, mutta ne ovat välttämättömiä, jotta seuraava työvaihe pääsee tekemään työnsä. Seppänen ja Kankainen (2004) ovat esittäneet työtehtävän suorittamisen jakamisen monelle mestalle johtavan siihen, että mestaa ei tehdä kerralla valmiiksi ja se on kyseisen työtehtävän osalta vielä keskeneräinen, kun seuraavan työvaiheen tulisi saapua mestalle. Työtehtäviä myös usein aloitetaan niin, että niitä ei pystytä suorittamaan loppuun tai ei ole varmuutta, pystytäänkö niitä suorittamaan loppuun. Tämä johtaa

pidempään läpimenoaikaan, suurempaan WIP:iin, huonompaan tuottavuuteen sekä huonompaan laatuun (mm. Evinger et al. 2013; Salem et al. 2018.) Ward ja McElwee (2007) ovat esittäneet näkemyksen, että aliurakoitsijoiden tulisi keskittyä tuottamaan arvoa tuotantoprosessissa seuraavaksi olevalle aliurakoitsijalle, eikä niinkään pääurakoitsijoille. Aliurakoitsijalla kuvataan olevan neljä asiakasta: tavarantoimittaja tai edellisen työvaiheen suorittaja, seuraavan työvaiheen suorittaja, pääurakoitsija tai maksaja ja loppukäyttäjä. Nykyrakentamisessa aliurakoitsijat kokevat asiakkaakseen ainoastaan pääurakoitsijan, eli maksajan. Kun aliurakoitsijat keskittyvät tekemään suoritustaan pääurakoitsijalle seuraavan työvaiheen sijaan, saattaa se johtaa suoritteen osaoptimointiin, eikä mestoja tehdä kyseisen suoritteen osalta kerralla valmiiksi. Kuvassa 2 on kuvattu seuraava työvaihe asiakkaana -periaate.



Esim. Sähkökaapelointi – Väliseinien tuplaus – Väliseinien tasointi

Kuva 2 Seuraava työvaihe asiakkaana -periaate, Ward ja McElwee (2007)

Yhtenä nykyrakentamisen ongelmana nähdään myös työvaiheiden liian suuret eräkoot. Työvaiheiden eräkoolla tarkoitetaan työvaiheen käyttöön luovutettavan mestan määrää, kuten esimerkiksi yksi huone tai yksi kerros. Ward ja McElwee (2007) mukaan, rakennusosalalla käytetään suuria eräkokoja, jotta voidaan varmistaa yksittäisten urakoitsijoiden työn jatkuvuus. Pienemmillä eräkoilla projektit voitaisiin toteuttaa nopeammin, halvemmin ja vähemmällä virheillä. Kun työt ulkoistetaan aliurakoitsijoille, ovat työntekijät taipuvaisia työskentelemään isommalla kuin tuotannon kannalta optimaalisella eräkoolla. Eräkokoja ei haluta pienentää, koska pelätään, että se johtaa tehottomampaan työskentelyyn. Yhtenä esteenä eräkokojen pienentämiselle nähdään se, että vaihtaessa työsuoritteesta toiseen, tulee usein vaihtaa myös työkaluja. Työntekijät pitävät tästä syntyvää hukkaa suurena, vaikka todellisuudessa työkalujen vaihtoon kuluu rakennustyömaalla usein vain muutamia minuutteja. Isoilla eräkoilla, eli niin sanotulla massatuotanto-periaatteella toimiva rakennustuotanto, on helppoa myöntää tehokkaaksi tavaksi työskennellä. Tämä vaikeuttaa eräkokojen pienentämistä rakennustuotannossa. Toisena esteenä eräkokojen pienentämiselle nähdään spesifeihin työtehtäviin erikoistuneet aliurakoitsijat, jotka myös Forsberg ja Saukkoriipi (2007) mainitsivat nykyrakentamisen yhdeksi ongelmaksi.

Nämä mainitut nykyrakentamisen ongelmat, eli pitkälle erikoistuneet aliurakoitsijat, projektien osaoptimointi, työntöohjattu tuotanto, aikataulun reaktiivinen ohjaus, työtehtävien aloitukseen keskittyminen ja suuri eräko, vaikuttavat rakentamisen tuottavuuteen ja voidaan yhdistää aiemmin todettuun rakentamisen teollisuudenalan tuottavuusongelmaan. Rakennusosalalla toimivien yritysten keinoksi ratkaista huonoon tuottavuuteen liittyviä ongelmia on esitetty Lean-filosofiaan pohjautuva Lean-rakentamista (Koskela et al. 2002). Seuraavassa kappaleessa syvennyttäänkin Lean-filosofiaan ja siihen pohjautuvaan Lean-rakentamiseen.

3 Lean rakentamisessa

3.1 Lean-filosofian tausta

Lean-filosofialla tarkoitetaan Lean-tuotannon mukaista ajattelutapaa. Termi Lean-tuotanto esiteltiin ensikertaa Womack et al. (1990) kirjoittamassa kirjassa ”The Machine That Changed the World”. Kirjasta on tullut yksi viime vuosikymmenien siteeratuimmista teoksista operaatioiden johtamisen tieteenalalla (Holweg 2007). Kirja pohjautuu MIT:n tekemään benchmarking-tutkimukseen, jossa amerikkalaista autoteollisuutta verrattiin japanilaiseen autoteollisuuteen, tarkemmin ottaen autojen valmistaja Toyotan tuotantoon. Toyota loi 1975 – 1984 välillä oman tuotantomallin, Toyotan mallin, englanniksi Toyota Production System (TPS) (De Bortoli Saggin et al. 2017). TPS:ää pidetään Lean-tuotantofilosofian perustana (Howell 1999).

”A philosophy that when implemented reduces the time from customer order to delivery by eliminating sources of waste in the production flow.” (Liker 1997)

Lean-filosofialla tarkoitetaan tapaa suunnitella tuotantojärjestelmät niin, että materiaalin, ajan ja tuotantoon syötetyn panoksen, kuten työn, hukat on minimoitu, tuottamalla samalla maksimaalinen mahdollinen arvo asiakkaan näkökulmasta (Koskela et al. 2002). Näihin tavoitteisiin päästään noudattamalla Lean-tuotannon-konseptia, jonka peruspiirteisiin kuuluu neljä elementtiä (Howell 1999):

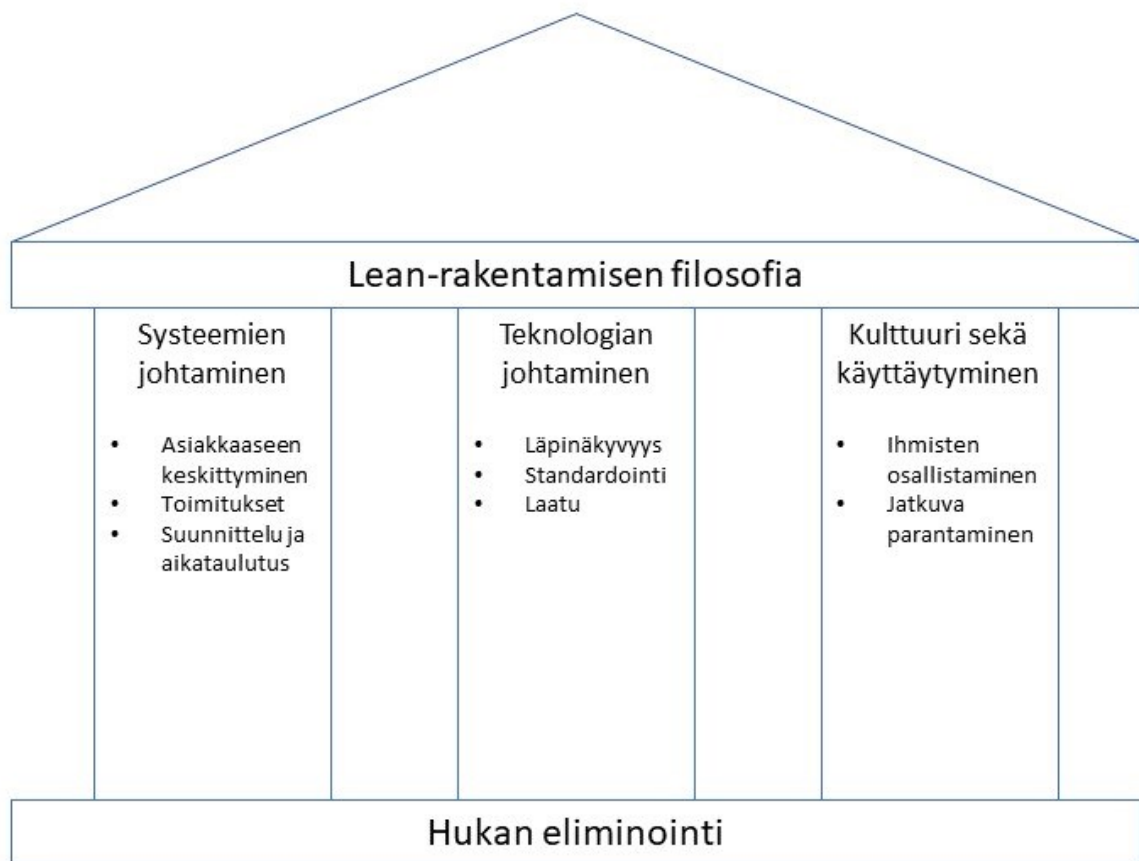
- Arvon tunnistaminen ja tuottaminen asiakkaan näkökulmasta: eliminoidaan kaikki, mikä ei lisää arvoa.
- Tuotannon organisointi noudattamaan jatkuvaa virtausta. Jatkuvalle tuotannon virtauksella tarkoitetaan virtausta, jossa työn tai tuotteen virtaus ei keskeydy.
- Virheetön tuote ja luotettava tuotannon virtaus tuotantolinjan pysäyttämisen, imuohjatun varaston ja läpinäkyvän informaation sekä päätöksen teon avulla. Imuohjatulla varastolla tarkoitetaan, että materiaaleja ei tilata, eikä tuotteita valmisteta varastoon tuotannon mahdollisen valmistuskapasiteetin, vaan asiakkaan ja tuotannon kysynnän mukaan.
- Täydellisyyteen pyrkiminen: asiakkaan vaatimuksia vastaavan tuotteen toimittaminen ilman mitään varastoja.

3.2 Lean-rakentaminen

Lean-rakentaminen perustuu, kuten Lean-tuotantofilosofiakin, asiakkaalle tuotetun arvon maksimointiin minimoimalla hukka tuotannosta. Lean-rakentaminen esiteltiin 1990-luvun puolessa välissä uutena konseptina. Tämän jälkeen on syntynyt kahta toisistaan eriävää käsitystä siitä, mitä Lean-rakentaminen on. Toinen näkemyksistä käsittelee Lean-rakentamista enemmän filosofiana ja toinen taas valikoimana erilaisia käytännön työkaluja tuotannon tehostamiseen ja hukan vähentämiseen, näistä filosofiapohjaisen näkemyksen esitetään saaneen enemmän kannatusta yleisössä. (Koskela et al. 2002.) Lean-rakentamista on kuitenkin kritisoitu siitä, että sille ei ole olemassa selkeää, yleisesti hyväksyttyä kuvausta, vaan sille on käytetty monia erilaisia kuvauksia riippuen asiayhteydestä. Mossman (2018) pyrki löytämään vastausta kysymykseen: *Mitä on Lean-rakentaminen?* Selvityksen perusteella hän ehdottaa kuvauksen olevan: ”Kokoelma teorioita, periaatteita, perusoletuksia, menetelmiä ja ajattelutapoja, jotka yhdessä ja erikseen voivat auttaa yksilöitä ja ryhmiä kehittämään prosesseja ja järjestelmiä, joiden parissa he työskentelevät.”. Mossmanin (2018) kuvaus Lean-rakentamisesta kokoelmana erilaisia toiminta- ja ajattelumalleja haastaa Koskela et al.

(2002) filosofiapohjaisen näkemyksen. Yhtä, yleisesti hyväksyttyä kuvausta Lean-rakentamiselle ei siis löydy. Yksiselitteisen teoriakuvauksen puuttumisesta onkin aiheutunut ongelmia esimerkiksi, kun Lean-rakentamista esiteltiin ensi kertaa Japanissa. Kuitenkin kirjallisuudessa esitettyjen Lean-rakentamista kuvausten sisällössä toistuu usein teemat: ”uusi tapa johtaa tuotantoa”, ”asiakkaalle tuotetun arvon maksimointi”, ”hukan minimointi”, ”jatkuva parantaminen”, ”ihmisten kunnioittaminen” ja ”tuotannon virtauksen parantaminen”. (Mossman 2018.)

Lean-rakentamiselle on kehitetty erilaisia toimintamalleja kirjallisuudessa. Bajjou ja Chafi (2018) vetävät yhteen näitä eri tahojen kehittämiä malleja. Mallien analyysin perusteella Lean-rakentamisen peruseriaatteiksi muodostui asiakkaaseen keskittyminen, toimitukset, jatkuva parantaminen, hukan eliminointi, ihmisten osallistaminen, suunnittelu ja aikataulutus, laatu, standardointi ja läpinäkyvyys. Tutkimuksessa esitetään, että nämä yhdeksän elementtiä muodostavat Lean-rakentamisen pilarit (Kuva 3), jotka perustuvat hukan eliminointiin, joka on Lean-rakentamisen ydinajatus. Lean-rakentamisen pääperiaatteet ovat jaettu kolmeen eri kategoriaan, jotka ovat systeemien johtaminen, teknologian johtaminen ja kulttuuri sekä käyttäytyminen.

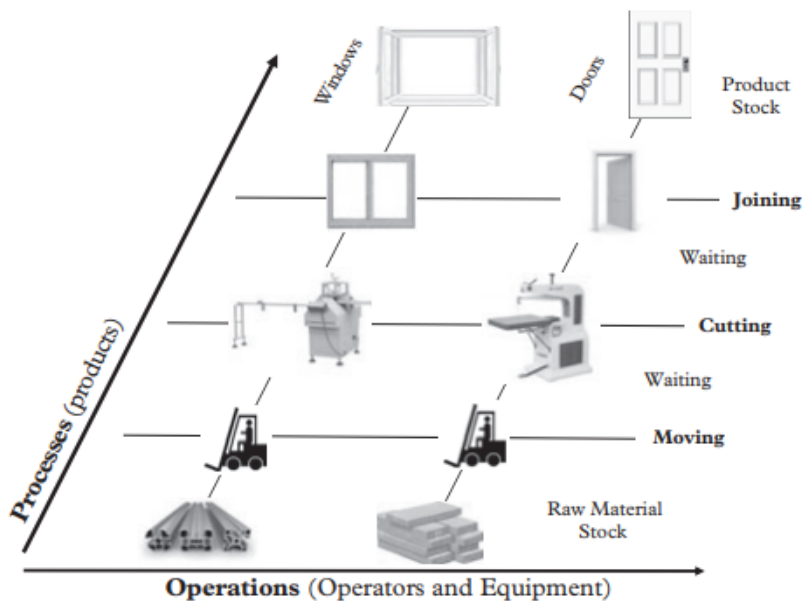


Kuva 3 Lean-rakentamisen ideologian peruspilarit, Bajjou ja Chafi (2018)

3.3 Virtaus ja vaihtelevuus

Tuotannon virtaus kuvailtiin ensimmäisen kerran Gilbrethien toimesta vuonna 1922, tämä kuvaus on toiminut valmistavassa teollisuudessa perustana JOT-ajattelulle (Koskela et al. 2002). Valmistavassa teollisuudessa tuotannon virtaus onkin hyvin sisäistetty käsite. Sen on

kuvailtu olevan joko polku, jonka tuote kulkee kehittyessään raakamateriaaleista lopputuotteeksi taikka tuotteen liikkuminen, eli virtaaminen polulla. Tätä polkua on kuvattu nimellä arvovirta ja sen varrella tapahtuvat tehtävät voidaan jakaa joko arvoa tuottaviin tai arvoa tuottamattomiin tehtäviin. Lean-tuotannon mukaan virtaus on hyvä, kun arvovirran polulla on mahdollisimman vähän arvoa tuottamattomia tehtäviä, eli mahdollisimman vähän hukkaa. (Sacks 2016.) TPS:ää kehittämässä mukana ollut Shingo on jakanut valmistavan teollisuuden tuotannon virrat kahteen kategoriaan: prosessin virtaukseen ja operaatioiden virtaukseen. Prosessin virtauksella tarkoitetaan tuotteen virtausta eri työpisteiden läpi ja operaatioiden virtauksella tarkoitetaan yhdellä työpisteellä, eli operaatiolla tapahtuvan työn virtausta tuotteesta toiseen. (Sacks 2016; Sacks et al. 2017.) Kuvassa 4 on kuvattu valmistavan teollisuuden tuotannon virrat. Vaaka-akseli kuvaa operaatioiden virtausta ja pystyakseli kuvaa prosessien, eli tuotteen virtausta.



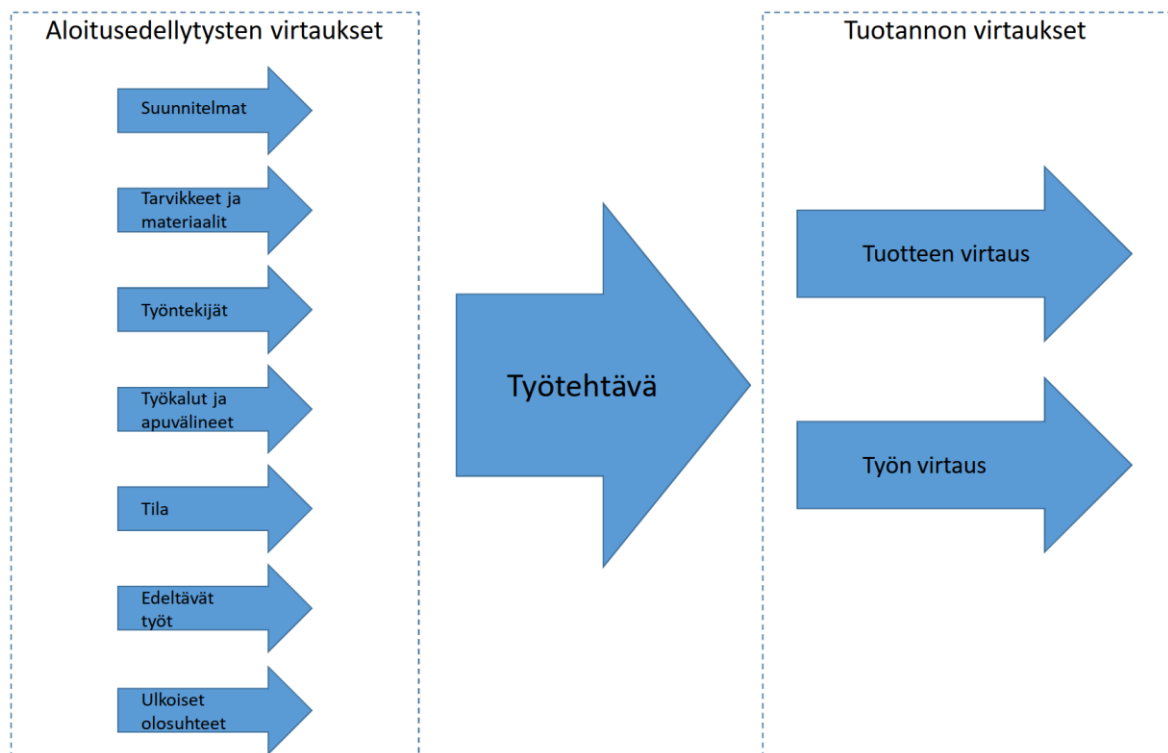
Kuva 4 Operaatioiden ja prosessien virtaus valmistavassa teollisuudessa, Sacks (2016)

Kansainvälisen Lean-rakentamisen ryhmän (IGLC) perustamisesta lähtien rakentamisen prosessia on kuvailtu työn virtauksena, joka tuottaa arvoa asiakkaalle (Bertelsen et al. 2006). Lean-rakentaminen painottaakin virtauksen konseptin olevan avainasemassa rakentamisen tuotannossa (Sacks et al. 2017). Rakentamisen tuotannon virrat ovat kuitenkin erilaiset kuin valmistavassa teollisuudessa, koska työryhmät virtaavat tilasta toiseen ja tuote, eli tilat, pysyvät paikoillaan (Sacks 2016). Rakentamisen tuotannon kahta virtausta, kuten valmistavan teollisuuden prosessien ja operaatioiden virtausta on kuvailtu monilla eri nimillä. Prosessin virtausta vastaavaa rakentamisen tuotannon virtausta kutsutaan tuotteen, työn, prosessin ja sijainnin virtaukseksi. Operaatioiden virtausta kutsutaan myös työn virtaukseksi ja työryhmien virtaukseksi. (Brodetskaia et al. 2011; Sacks 2016; Sacks et al. 2017.)

Selkeyden vuoksi tässä diplomityössä valmistavan teollisuuden prosessien virtausta vastaavaa virtausta rakentamisessa kutsutaan tuotteen virtaukseksi ja operaatioiden virtausta vastaavaa virtausta työn virtaukseksi. Työn virtauksella tarkoitetaan yhden työsuorituksen tai työpaketin virtaamista tilasta toiseen. Tuotteen virtaus rakentamisessa tarkoittaa taas eri työvaiheiden virtausta mestan läpi, vaikka mestat, eli tuotteet, eivät fyysisesti liiku mihinkään, niiden läpi virtaavat työvaiheet jalostavat mestaa jatkuvasti kohti valmista lopputuotetta (Sacks et al. 2017). Näin mestalle syntyy arvovirta jatkuvasta jalostamisesta ja työryhmien arvovirta työn virtauksessa muodostuu eri mesteissa toistuvista arvo tuottavista tehtävistä.

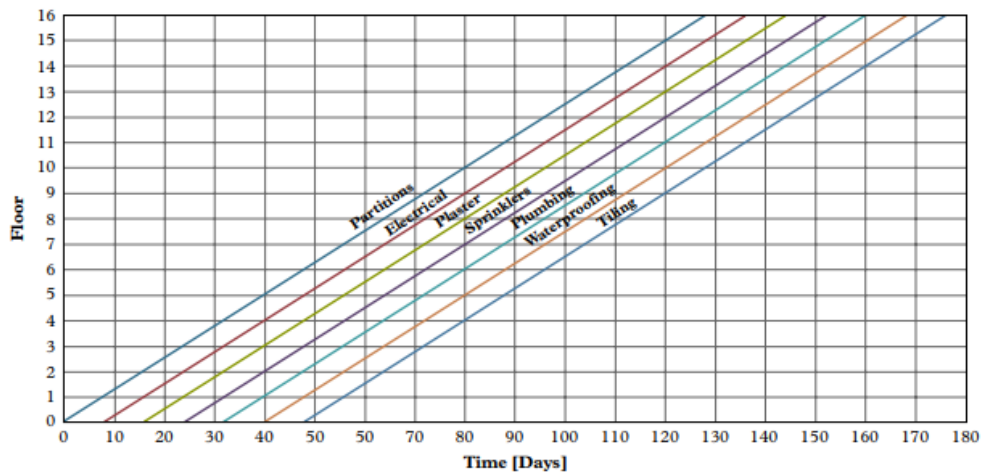
Rakentamisessa optimaalisen tuotannon virtauksen saavuttaminen samanaikaisesti kaikkien työntekijöiden optimaalisen tuottavuuden kanssa on kuitenkin hyvin epätodennäköistä (Sacks et al. 2017). Myös hyvän tuotteen virtauksen ja työn virtauksen saavuttaminen samanaikaisesti on hyvin haastavaa. Tähän on esitetty vaikuttavan vaihtelu, mutta sitäkin suuremmin eri osapuolien eriävät tavoitteet. Aliurakoitsijoiden tavoitteena on maksimoida rahallinen hyöty suhteessa käytettyyn työaikaan, eikä niinkään projektin tuottavuuden maksimointi. Tämä johtaa usein väärään etenemisjärjestykseen työmaalla, ”making-do”-muodossa olevaan hukkaan ja uudelleen tekemiseen sekä WIP:in kumulatiiviseen kasvuun. (Sacks 2016.) Making-do –muodossa olevalla hukalla tarkoitetaan hukkaa, jota syntyy, kun työtehtävä aloitetaan ilman, että sen aloitusedellytykset ovat kunnossa tai työtehtävää jatketaan, vaikka joku sen aloitusedellytyksistä ei enää täytyisi (Koskela 2004).

Koskela (2000) on määritellyt seitsemän eri aloitusedellytysten virtausta rakentamisen työtehtävän suorittamiselle. Näitä aloitusedellytysten virtauksia ovat suunnitelmat, tarvikkeet ja materiaalit, työntekijät, työkalut ja apuvälineet, tila, edeltävät työt ja ulkoiset olosuhteet. Mikäli jokin näistä aloitusedellytysten virtauksista puuttuu tehtävää ei voida sellaisenaan suorittaa ilman making-do –muodossa olevaa hukkaa. Seitsemän eri aloitusedellytyksen tulee virrata jokaiselle työtehtävälle, jotta edellä kuvatut tuotannon virtaukset ovat mahdollisia. Kuvassa 5 on kuvattu Koskelan (2000) seitsemän aloitusedellytyksen virtausta yhdistettynä Sacks (2016) esittämään kahteen rakentamisen tuotannon virtaukseen.



Kuva 5 Työtehtävien aloitusedellytysten virtaukset ja tuotannon virtaukset rakentamisessa

Kuvassa 6 on kuvattu optimaalinen tuotannon virtaus rakentamisessa vinoviiva-aikataulussa esitettynä. Tuotteen virtaus voidaan havaita pystyakselilla kuvattujen kerrosten läpi virtaavia tehtäviä, jokaisen mestan läpi on jatkuva työvaiheiden virtaus. Vinoviivat kuvaavat työn virtausta, eli työryhmien virtausta mestalta toiselle. Rakennusprojektia kutsutaan yksittäisvirtaavaksi, kun jokaisella työryhmällä on työt käynnissä vain yhdellä mestalla kerrallaan ja heidän ei enää tarvitse palata samalle mestalle uudestaan. (Sacks et al. 2017.)



Kuva 6 Optimaalinen tuotannon virtaus, Sacks et al. (2017)

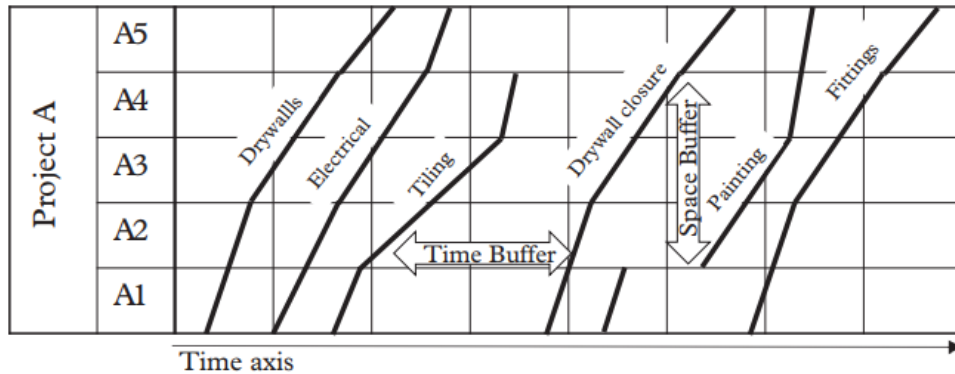
Sacks et al. (2017) mukaan optimaalisen virtauksen saavuttamiseen tarvitaan seuraavat yhdeksän asiaa:

- Lähes identtiset tahtiajat jokaiselle työryhmälle, eli työn kesto jokaisessa mestassa jokaisella työvaiheella on sama
- Stabiili työvauhti jokaiselle työryhmälle
- Pienet eräkoot
- Minimoitu mestan tyhjillään olo/aikapuskurit työvaiheiden välillä
- Minimoitu arvoa tuottamaton aika työtehtävissä
- Laatua ensimmäisellä kerralla, ettei tarvitse tulla korjaamaan jo tehtyä työtä
- Työtehtävien määrän minimointi, eli työtehtävien yhdisteleminen ja erikoistumisalojen karsiminen
- JOT-toimitukset esivalmistetuille osille, kuten oville ja ikkunoille
- JOT-toimitukset materiaaleille

Näistä ensimmäiset neljä mahdollistavat hyvän tuotteen virtauksen, seuraavat kolme mahdollistavat hyvä työn virtauksen ja kahta viimeistä kuvaillaan liittyvän muihin virtauksiin (Sacks et al. 2017).

Perinteisesti rakentamisessa tuotannon virrat jätetään kuitenkin usein huomiotta ja rakentamisen tuotannon virtausta kuvaillaankin heikoksi, jossa prosessin eri työvaiheet ovat löyhästi yhteydessä toisiinsa. Tämä kasvattaa aikaa eri työvaiheiden välissä samalla mestalla. Ilmiö on helposti havaittavissa vinoviiva-aikataulusta tyhjinä alueina viivojen välissä. Tätä aikaa voidaan mitata käyttäen yksikkönä tilaa, eli esimerkiksi tyhjillään olevien tilojen määrää työmaalla, tai käyttäen yksikkönä aikaa, eli mittaamalla aikaa, jonka tila odottaa seuraavaa työryhmää edellisen poistuttua tilasta. (Sacks 2016.) Kuvassa 7 on osoitettu nuolella ”Time Buffer” kahden eri työvaiheen välinen aika sijainnissa ja nuolella ”Space Buffer” tyhjillään olevien sijaintien määrä eri työvaiheiden välissä. Tyhjillään olevat tilat eivät kuitenkaan aina ole syntyneet tuotannon virtausten huomiotta jättämisestä tai huonosta aikataulusuunnittelusta. Esimerkiksi sijaintipohjainen LBMS-aikataulutuksen menetelmä käyttää kiinteitä tila- ja aikapuskureita keinona korjata poikkeamia tuotannosta (Seppänen 2014; Frandson et al. 2015). LBMS-menetelmä on sijaintipohjainen aikataulutuksen menetelmä, joka on kehitetty aiempien sijaintipohjaisten aikataulutuksen menetelmien pohjalta (Kenley & Seppänen

2010). LBMS-menetelmän mukaan aika- ja tilapuskureita tarvitaan, jotta työtehtävien myöhästymisistä aiheutuvat kasautuvat viiveet voidaan poistaa ennen kuin ne vaikuttavat seuraavaan työvaiheeseen ja johtavat tulevien työvaiheiden uudelleen aikatauluttamiseen. Aika- ja tilapuskurit mahdollistavat reagointiajan näihin poikkeamiin eri työvaiheiden välissä. (Seppänen 2014.)



Kuva 7 Aika- ja tilapuskurit osoitettuna vinoviiva-aikataulussa, Sacks (2016)

Jatkuvaa, häiriötöntä tuotannon virtausta on kuitenkin rakentamisessa lähes mahdotonta saavuttaa vaihtelun vuoksi. Vaihtelu on yleisesti tunnistettu haaste rakennusprojekteissa (Frag 2014) ja rakennushankkeet ovatkin hyvin tunnettuja vaihtelevista tuotantonopeuksistaan (Brodetskaia & Sacks 2007). Vaihtelun on virallisesti määritelty olevan epäyhtenäisyyden ominaisuus joukossa. Vaihtelu voidaan jakaa estettäviissä olevaan vaihteluun ja satunnaiseen vaihteluun. (Hopp & Spearman 2011, s. 265.) Mikäli tuotannossa ei olisi ollenkaan vaihtelua, voitaisiin sitä kutsua luotettavaksi (Tommelein et al. 1999). Rakentamisessa vaihtelun poistaminen kokonaan tuotannosta on kuitenkin hyvin epätodennäköistä. Tommelein et al. (1999) simuloivat vaihtelun vaikutusta rakennustuotantoon ja huomasivat, että vaihtelun ollessa suurta tuotannossa, mestat eivät saavuttaneet parasta tuotantokapasiteettiaan ja työvaiheiden väliin tarvittavat puskurit olivat suuria.

Vaihtelun tuhoisa vaikutus työn virtaukseen on tunnistettu jo Lean-filosofian perusteoksissa (mm. Womack & Jones 1996). Horman ja Thomas (2005) esittävät, että tuotannon suunnittelulla, joka tekee työn virtauksesta luotettavamman, voitaisiin vähentää tuotannossa ilmenevää vaihtelua. Frag (2014) esittääkin, että juurikin mitä luotettavampi työn virtaus on, sitä vähemmän tuotannossa on vaihtelua. Ballard ja Howell (1994; 1998) tekemät tutkimukset osoittavat rakennushankkeiden työn virtauksessa ilmenevän vaihtelun olevan suurta ja jatkuvaa läpi koko projektin. Ennen heidän tekemiä tutkimuksiaan yleinen käsitys rakentamisen tuotannossa olevasta vaihtelusta oli, että se on ulkoista vaihtelua, johon ei voida vaikuttaa. Tutkimukset kuitenkin osoittivat, että suurin osa vaihtelun aiheuttavista syistä olisi ollut urakoitsijoiden vaikutettavissa. (Ballard & Howell 2003.) Myös Brodetskaia ja Sacks (2007) huomasivat, että eri työvaiheiden tuotantonopeudet vaihtelivat, jopa silloin kun tehtävän kaikki aloitusedellytykset olivat kunnossa. Tätä vaihtelua kutsutaan sisäiseksi vaihteluksi. Työn virtauksen suuresta vaihtelusta, epäselvästä tilannekuvasta ja lyhyellä aikavälillä tapahtuvien tuotannonohjauskeinojen puutteesta johtuen työntekijät joutuivat keskenään neuvottelemaan millä mestalla kukin työskentelee. Tämä johti siihen, että työntekijät liikkuvat ympäri työmaata etsien itselleen seuraavaa mestaa. Kun työntekijät joutuivat etsimään itselleen uutta mestaa, syntyi tuotantoon enemmän vaihtelua. (Brodetskaia & Sacks 2007.)

Rakennustuotannossa vaihtelun vaikutuksilta on perinteisesti suojauduttu käyttämällä tuotannossa erilaisia puskureita (Horman & Thomas 2005). Hopp ja Spearmann (2011, s. 309) esittelevät tehdasfysiikkaa käsittelevässä kirjassaan puskuroinnin lain. Puskuroinnin lain mukaan prosesseja, joissa on vaihtelua, tulee puskuroida käyttäen varasto- (eli esim. tila-), kapasiteetti-, aikapuskureita tai niiden yhdistelmiä. Puskureiden käytöllä estetään vaihtelun epätoivotut vaikutukset prosessiin (Farang 2014) ja ne tekevät prosessista luotettavamman (Horman & Thomas 2005). On kuitenkin esitetty, että Lean-filosofiassa puskurit nähdään perinteisesti hukkana (Sakamoto et al. 2002). Lean-filosofian tunnistaessa vaihtelun tuhoiset vaikutukset tuotantoon, voidaan kuitenkin epäillä sen kieltämästä kaikkien puskureiden käytön. Ennemminkin, tarpeettomien puskureiden käyttö on hukkaa. Niin kauan, kun rakentamisen tuotannossa on vaihtelua, on puskurin muodossa oleva arvoa tuottamaton elementti tuotannossa tarpeellinen (Sakamoto et al. 2002). Puskureiden avulla voidaan vähentää esimerkiksi tuotantomääristä, suunnitteluvirheistä, valmistusvirheistä, huonosta työskentelystä tai epäsuotuisista olosuhteista johtuvan vaihtelun vaikutusta tuotantoon (Horman & Thomas 2005).

Kapasiteettipuskurilla tarkoitetaan työryhmän tai koneen työkuorman tarkoituksellista alimitoittamista (Horman & Thomas 2005). Ballard (1999) suosittelee työryhmien työkuormien alimitoittamista, eli kapasiteettipuskureiden käyttöä, työn virtauksessa olevan vaihtelun vuoksi. Kapasiteettipuskureiden käyttö voi johtaa kuitenkin työryhmän välittömän tuottavuuden laskuun, mikäli varamestaa ei ole määritetty (Ballard 1999). Varamestalla tarkoitetaan mestaa, johon työryhmä voi siirtyä työskentelemään, mikäli saa työtehtävänsä suoritettua ilman kapasiteettipuskurin käyttöä. Ballard (1999) on esittänyt näkemyksen, että työryhmät saavat mestansa edelliseltä työvaiheelta, jolloin jos mestojen luovutusta edelliseltä työvaiheelta toiselle voitaisiin parantaa käyttämällä kapasiteettipuskureita, hyötyisivät niiden käytöstä kaikki muut paitsi ensimmäistä työvaihetta tekevä työryhmä. Howell et al. (2001) osoittavat, kuinka mitä lähempänä työryhmän työkuorma on suurinta mahdollista arvoa, sitä enemmän prosessissa on odottamisen muodossa olevaa aikaa. Tällöin työryhmät tekevät oman työsuorituksensa suurella tuottavuudella, mutta koko projektin aikataulu venyy (Howell et al. 2001). Tämä yhdistää työn ja tuotteen virtauksen sekä tuotannossa vaihtelun vuoksi käytettävät puskurit. Käytettäessä kapasiteettipuskureita, voidaan lyhentää koko hankkeen rakennusaikaa, mutta työvaiheiden tuottavuus laskee ja työryhmät voivat joutua odottelemaan työtä, kun taas käytettäessä aika- tai tilapuskureita yksittäiset työvaiheet voidaan todennäköisesti tehdä nopeammin, paremmalla tuottavuudella, mutta tilat joutuvat odottelemaan, joka ilmenee koko projektin pidempänä aikatauluna.

Tuotantoa voidaan siis tehostaa ja tätä kautta tuottavuutta parantaa, parantamalla tuotannon virtauksia. Virtausten parantaminen tapahtuu minimoimalla hukkaa virtauksesta. Erilaiset puskurit nähdään arvoa tuottamattomina elementteinä, eli hukkana, tuotannon virtauksissa, mutta ne ovat vaihtelun vuoksi välttämättömiä. Sacks (2016) mukaan tuotteen virtausta parantamalla on suurempi potentiaali kehitykseen kuin optimoimalla yksittäisiä työn virtauksia, koska se on perinteisesti jätetty rakentamisessa huomiotta. Tämä tarkoittaa siis, että hukkaa tulisi minimoida eri työvaiheiden välistä ja työt tulisi suorittaa tasaisilla työtehoilla, lyhyillä läpimenoajoilla ja pienellä WIP:illä (Sacks et al. 2017). Tommelein et al. (1999) on kuitenkin osoittanut vaihtelun tuhoiset vaikutukset juurikin työn virtaukseen ja tuotannossa nähdään olevan sitä enemmän vaihtelua, mitä epäluotettavampi työn virtaus on (Farang 2014).

Kumpaakaan virtausta ei tule siis unohtaa, vaan vaihtelun vaikutukset tulee minimoida sopivalla yhdistelmällä erilaisia puskureita, mutta kuitenkin niin, että tuotannon virtaukset pysyvät mahdollisimman hyvinä, eli sisältävät mahdollisimman vähän hukkaa. Virtauksen käsitettä ei pysty kuitenkaan täysin ymmärtämään ilman, että ymmärtää hukan käsitteen ja päinvastoin (Kalsaas 2013). Seuraavassa kappaleessa syvennyttäänkin hukan käsitteeseen sen määritelmien ja eri hukkatyyppien kautta.

4 Hukka

4.1 Hukan määritelmät

Hukan vähentäminen on sekä Lean-rakentamisen että Lean-tuotannon keskiössä (mm. Liker 1997; Bajjou & Chafi 2018). Hukalla tarkoitetaan mitä vain toimintaa, joka ei edistä yrityksen liiketoimia, kuten odottaminen, kasautuvat keskeneräiset tuotteet, materiaalien siirtäminen tai muu vastaava toiminta. Tuotannossa voidaan sanoa olevan kahdenlaisia toimia: arvoa tuottavia ja arvoa tuottamattomia. Arvoa tuottamattomat toimet, kuten osien hakeminen, materiaalkuormien purkaminen voidaan kuvata olevan hukkaa. Arvoa tuottavat tehtävät taas muokkaavat materiaalia tai tuotetta kohti valmiimpaa lopputuotetta. (Shingo 1989, s. 76.)

Hukkaa rakentamisessa käsittelevät tutkimukset kuvaavat hukkaa erilaisin tavoin, esimerkiksi Formoso et al. (1999) kuvaavat hukan olevan resurssien käyttöä suuremmalta osin kuin olisi tarvetta, kun taas Forsberg ja Saukkoriipi (2007) näkevät hukan kustannuksia, jotka ovat arvoa tuottamattomia. Koskela et al. (2013) ovat kritisoineet Shingo (1989) kuvaamien hukkien sopivuutta kuvaamaan sellaisenaan rakennustuotannossa ilmeneviä hukkia. Seuraavassa alaluvussa syvennyttään tähän aiheeseen perehtymällä erilaisiin hukkatyyppeihin.

4.2 Hukan eri muodot

Hukkaa voi ilmetä tuotannossa monissa eri muodoissa. Hukan käsitteen selkeyttämiseksi hukkien eri muodot on hyvä jakaa kategorioihin. Hukat voidaan jakaa esimerkiksi välttämättömään ja vältettävissä olevaan hukkaan. Välttämätön hukka, eli niin sanottu luonnollinen hukka, on hukkaa, jonka vähentäminen aiheuttaisi enemmän kustannuksia kuin hyötyjä. Vältettävissä oleva hukka on taas hukkaa, jonka aiheuttamat kustannukset ovat merkittävästi suuremmat kuin kustannukset, jotka hukan vähentämisestä aiheutuisivat. (Formoso et al. 1999.)

Hukat voidaan jakaa eri kategorioihin myös niiden alkuperän mukaan, eli tietyn hukan muodon syntymisen juurisyyn mukaan. Yksi siteeratuimmista tuotannon hukkien kategorisoinneista on ”Seitsemän hukkaa”. (Formoso et al. 1999.) Seitsemän hukkaa on ensikerran esitelty Taiichi Ohnon (1978) kirjoittamassa kirjassa nimeltään *Toyota Seisan Hōshiki*. Seitsemän hukkaa listaa tuotannon hukiksi ylituotannon, odottamisen, kuljettamisen, prosessoinnin, varastoinnin, liikkeen ja virheellisten tuotteiden tekemisen. Ohnon mukaan näiden hukkien eliminointi tuotannossa johtaa tuotantokustannusten vähentymiseen, jonka myötä tuotannosta syntyvä voitto kasvaa. Ylituotanto nähdään tärkeimpänä hukkana, joka toimii myös muiden hukkien aiheuttajana. Hukkien nähdään olevan ikään kuin ylituotannon aiheuttama ketjureaktio. (Koskela et al. 2013.)

Seitsemän hukkaa käsittelee valmistavassa teollisuudessa ilmeneviä hukkia ja Koskela et al. (2013) kritisoivatkin Seitsemän hukan soveltuvuutta rakennusosalalle. Heidän mukaansa ylituotanto ei ole niin oleellisessa asemassa tehtäessä rakennuksen kaltaista uniikkia projektia kuin autoteollisuuden tapaisessa massatuotannossa. Koskela et al. (2013) ehdottavatkin making-do -muodossa olevaa hukkaa rakennusalan tärkeimmäksi hukaksi. Esimerkkinä making-do -hukasta on mainittu tilanne, jossa suunnittelijalla ei ole täydellisiä tietoja tilaajalta, mutta tekee jonkin olettamuksen mukaisen suunnitelman ja toimittaa sen työmaalle. Rakennusurakoitsija rakentaa suunnittelijan tekemän olettamuksen mukaan, jonka jälkeen selviää, että toteutus ei vastaa tilaajan vaatimuksia. Tällöin making-do -hukka on toiminut alkupe-

ränä hukalle, joka on virheellisen tuotteen muodossa. Virheellinen tuote aiheuttaa tässä tapauksessa sekä uudelleen suunnittelua että uudelleen rakentamista. Making-do –hukkaa aiheutuu myös siitä, että työtehtävät halutaan aloittaa aikaisimpana mahdollisena ajankohtana, eli tuotannon ollessa niin sanotusti työntöohjattua (Koskela 2004).

Hukkaa esiintyy rakentamisessa erilaisissa muodoissa, Formoso et al. (1999) esittivät oman kategorisointinsa rakentamisessa esiintyville hukille perustuen sekä edellä kuvattuun Seitsemään hukkaan että tutkimusryhmän tekemään tarkkailuun työmailla. Tutkimuksessa erilaisiksi hukiksi rakentamisessa tunnistettiin ylituotanto, korvaaminen, odottaminen, prosessointi, varastointi, liike, virheelliset tuotteet ja muut niin sanotusti ulkoisista tekijöistä aiheutuvat hukut. Tätä kategorisointia on avattu seuraavasti:

- Ylituotanto: Ylituotantoa syntyy, kun tuotetaan enemmän tai aiemmin kuin on vaadittu. Tästä aiheutuu hukkaa materiaaleissa, työvoimassa ja työvälineissä. Ylituotannosta seuraa myös yleensä keskeneräisten tuotteiden varastoa, eli niin sanottua WIP:iä.
- Korvaaminen: Korvaamisella tarkoitetaan niin sanottua ylilaatua, eli esimerkiksi kun käytetään liian hyvillä ominaisuuksilla olevaa, kalliimpaa materiaalia, käytetään liian ammattitaitoista työntekijää yksinkertaisten työtehtävän suorittamiseen tai liian kehittynyttä konetta helpon työn suorittamiseen.
- Odottaminen: Odottamisella tarkoitetaan odottamiseen kuluvaan aikaan, joka johtuu siitä, että työvaiheita ei ole tahdistettu. Odottamista syntyy esimerkiksi, kun työryhmältä loppuu vapaana oleva mesta ja he joutuvat odottamaan seuraavan mestan vapautumista.
- Prosessointi: Prosessoinnista syntyy rakentamisessa aina jonkin verran hukkaa, esimerkiksi materiaalien käsittelyssä. Esimerkiksi materiaalien sahaaminen on prosessin muodossa olevaa hukkaa.
- Varastointi: Liialliset ja tarpeettomat varastot nähdään hukkana, jotka johtavat sekä materiaalihukkaan että rahallisiin menetyksiin.
- Liike: Työntekijöiden tarpeeton ja tehoton liike työmaalla nähdään hukkana.
- Virheelliset tuotteet: Virheellisellä tuotteella tarkoitetaan tuotetta, joka ei vastaa asetettuja vaatimuksia. Tämä johtaa joko korjaamiseen tai uudelleen tekemiseen.
- Muut: Niin sanotuista ulkoisista tekijöistä, kuten murtovarkauksista, vandalismista tai muista vahingoista aiheutuva hukka.

Hukkaa syntyy odottamisen muodossa myös silloin kun keskeneräinen tuote, eli esimerkiksi huone, on tyhjiään eikä siellä tehdä arvoa tuottavaa työtä (Aslesen et al. 2019). Hukka on tällöin odottamisen muodossa, jossa työ odottaa tekijää. Aslesen et al. (2019) näkevät tämän hukan aiheuttajana sen, että aliurakoitsijat ovat liian erikoistuneita omiin työtehtäviinsä. Esimerkkinä kyseenalaistetaan sitä, miksi talotekniikkaurakoitsijan pitää palata asuntoon kytkeään liesituuletin muiden töiden jälkeen, vaikka keittiöurakoitsija voisi tehdä sen samalla, kun hän asentaa keittiön. Tutkimuksen tuloksissa esitetään, että tuotannon yksikkönä tulisi käyttää yhtä asuntoa, perinteisten yksikköjen (esimerkiksi: juoksumetri tai m²) sijaan. Näin yhden asunnon valmistamiseen kuluva aika olisi helpommin määriteltävissä ja aika, jolloin asunto on tyhjiään, eli tuote ei jalostu, olisi selkeämmin määritettävissä.

4.3 WIP

WIP, eli Work In Progress, on hyvin sisäistetty tuotannon mittari valmistavan teollisuuden prosesseissa, mutta yksittäisissä rakennusprojekteissa sitä hyödynnetään vielä vähän. WIP

tarkoittaa nimensä mukaisesti, mitä vain keskeneräistä työtä tai aluetta, jolla ei työskennellä tuotannon ollessa käynnissä. Kun projektien aikatauluja on alettu suunnittelemaan paikka-aikakaavioilla perinteisten jana-aikataulujen sijaan, jolloin tila on huomioitu yhtenä resursina, on projektien suuri WIP:in määrä tullut paljon ilmeisemmäksi. Rakennusosalalla WIP:iä on perinteisesti tarkasteltu vain eri projektien välillä huomioimalla, kuinka monta projektia on yhtä aikaa käynnissä, jotta saavutetaan tasainen tuotantomäärä. Tämä WIP:in käsittelytaso on kuitenkin liian alhainen, mikäli halutaan optimoida myös yksittäisiä projekteja ja vähentää hukkaa niiden prosesseissa. Yksittäisten projektien tasolla tämä on mahdollista, mikäli aikataulu on esitetty muodossa, jossa WIP on tunnistettavissa, jonka jälkeen WIP otetaan mukaan rakentamisen tuotannonjohtamisen parametriksi. (Faloughi et al. 2015.)

Perinteisesti rakentamisessa noudatetaan työntöohjattua tuotantoa, eikä aikataulua suunnitella yhdessä eri hankkeen osapuolien kanssa. Tästä johtuen eri tehtävien välille syntyy paljon WIP:iä, koska eri työvaiheiden tuotantotehot eroavat toisistaan, jolloin työvaiheet etenevät eri nopeuksilla. Tästä syntyy hukkaa prosessiin, pääoma joudutaan sitomaan pidemmäksi aikaa ja peräkkäiset työvaiheet ovat alttiimpia törmäykselle. (Faloughi et al. 2015.) Tarpeetonta WIP:iä syntyy myös paljon, kun jo aloitetun työtehtävän loppuunsaattaminen viivästyy ja uusia työtehtäviä aloitetaan kuitenkin ajallaan. Nämä roikkumaan jäävät työt voivat koitua kalliiksi aliorakointsijoille ja hankaloittavat pääurakoitsijan työtä kokonaisuuden hallinnassa kasvaneen WIP:in myötä. (Salem et al. 2018.) Ratkaisuna tähän on esitetty käytettäväksi imuohjattua tuotantoa tai CONWIP-tuotantoa (Constant Work in Progress), jossa WIP:in määrä rajoitetaan vakioksi. Kun rakennushanketta johdetaan kriittisen polun -menetelmään perustuvalla aikataululla, eli työnohjatulla aikataululla, jää WIP helposti huomioimatta taikka sitä käsitellään haluttuna puskurina. Tällöin on mahdotonta tunnistaa, missä WIP on ja sitä pidetään jopa toivottuna ilmiönä, jolloin sen vähentämiseen ei ole halukkuutta. Jotta WIP voidaan ottaa huomioon tuotannon suunnittelussa, on sen visualisointi avainasemassa. Tämä on kuitenkin hankalaa varsinkin kriittisen polun -kuvaajilla ja perinteisillä jana-aikatauluilla. (Faloughi et al. 2015.)

Sijaintipohjaisen LBMS-menetelmän kuvataan taas ideaalisessa tilanteessa poistavan sekä työntekijä odottaa työtä että työ odottaa työntekijää muodossa olevia hukkia (Seppänen 2014). Työ odottaa työntekijää muodossa olevaa hukkaa, eli tarpeetonta WIP:iä, on ohjeistettu poistamaan optimoimalla työvaiheet etenemään samalla nopeudella, eli löytämällä vinoviivoille sama kulmakerroin (Kenley ja Seppänen 2010, s. 221-230). WIP:iä ohjeistetaan poistamaan myös minimoimalla niin kutsuttuja epäsuoria puskureita. Epäsuorilla puskureilla tarkoitetaan puskureita, joita syntyy suurien eräkokojen käytöstä. Työvaiheet ohjeistetaan suunnittelemaan pienille eräko'oilta, jolloin epäsuorat puskurit ja niiden aiheuttama tarpeeton WIP pysyvät minimissä. (Frandsen et al. 2015.)

WIP:iä voi esiintyä rakentamisessa erilaisissa muodoissa. Faloughi et al. (2015) ovat jaotelleet rakennustuotannossa ilmenevät WIP:it kolmeen eri kategoriaan:

- WIP peräkkäisille tehtäville, joka voidaan jakaa vielä kahteen alakategoriaan:
 - WIP yhden työvaiheen sisällä, eli tarpeettoman suuri tuotantoerä. Tällä tarkoitetaan WIP:iä, joka syntyy, kun esimerkiksi maalarilla on viisi asuntoa työn alla, vaikka todellisuudessa työskentelee vain yhdessä kerrallaan.
 - WIP eri työvaiheiden välillä. WIP:iä syntyy eri työvaiheiden välille siitä, kun työvaiheet etenevät eri nopeuksilla.

- **WIP toimitusketjussa**
 - Toimitusketjussa syntyvä WIP mitataan työmaalla varastoitujen tuotteiden ja materiaalien määrinä. Tätä WIP:iä voidaan vähentää materiaalien JOT-toimituksilla.
- **WIP rakentamisen eri vaiheissa**
 - Työmaan eri vaiheissa, kuten runko- ja sisätyövaiheissa aikataulutuksessa käytettävä aluejako kannattaa tehdä vaihekohtaisesti minimoidakseen hukan ja WIP:in määrän. Mikäli tähän ei ole kiinnitetty huomiota, saattaa koko projektin läpimenoaika pidentyä tarpeettomasti.
 - Esimerkiksi talotekniikan runkolinjojen asennukset tarvitsevat isomman asennusalueen kuin niiden jälkeen tulevat työvaiheet. Mikäli eräkoot pidetään samana, syntyy paljon tarpeetonta WIP:iä.

WIP:in rajoittamisella rakennushankkeissa pyritään minimoimaan odottamisen muodossa olevaa hukkaa, tarkemmin ottaen hukkaa, joka syntyy, kun työ odottaa työntekijää tai työntekijä odottaa työtä. Priorisoimalla työ odottaa työntekijää -muodossa olevan hukan minimointia ollaan saavutettu hedelmällisiä tuloksia. Kun työntekijät eivät ole koko ajan niin kiireisiä, heille jää aikaa esimerkiksi prosessin kehittämiseen, jonka avulla voidaan mahdollistaa Lean-rakentamisen mukainen jatkuva parantaminen. Jotta WIP:in optimoinnista saataisiin täysi hyöty, tulee kohdetta tarkastella kokonaisuutena, eikä sitä voi tehdä ainoastaan yksittäisille tehtäville tai alueille. Kun WIP:in käsite ja tapa, kuinka sitä tulisi käsitellä tuotukseen hyötyä projektille, tulee kaikkien hankkeen osapuolien tietoisuuteen, on helpompaa suunnitella ja koordinoita projekteja. (Faloughi et al. 2015.)

4.4 Hukan mittaaminen

Mikäli hukkaa halutaan vähentää ja toimintaa tehostaa, on hukan mittaaminen avainasemassa. On esitetty, että vaatimuksena jatkuvaan parantamiseen pyrkivällä Lean-rakentamisen prosessilla on, että systeemi pystyy mittaamaan prosessissa olevaa hukkaa. Tavallista kuitenkin on, että Lean-rakentamisen mukaisia toimintatapoja implementoidaan, mutta mitauksiin ei kiinnitetä huomiota. Voidaan esimerkiksi mitata vain implementoinnin vaikutuksia läpimenoaikaan, mutta hukan ja tuottavuuden mittaaminen on harvinaista. Mittaamalla hukkaa saadaan luotua hyödyllistä dataa, jota sekä yksittäiset yritykset että koko rakennusala pystyy hyödyntämään toiminnan tehostamiseen. Jopa jo pohtimalla, mitkä tehtävät ovat arvoa tuottavia ja mitkä eivät, saattaa olla avuksi, kun rakennushankkeiden tuotantoa pyritään minimoimaan. (Forsberg & Saukkoriipi 2007.)

Hukkaa rakentamisessa on mitattu esimerkiksi havainnoimalla (mm. Lee et al. 1999; Gouett et al. 2011), haastatteluilla (mm. Teo & Loosemore 2001) ja kyselyillä (mm. Kalsaas 2013; Loosemore 2014). Kalsaas et al. (2014) ovat kuvanneet, kuinka hukkaa mittaavien tutkimusten tuloksissa on hyvin paljon vaihtelua. Eri hukkaa mittaavien tutkimusten tulosten vaihtelevuus havaittiin myös Horman ja Kenley (2005) tekemässä hukkaa mitanneiden tutkimusten meta-analyysissä. Kalsaas et al. (2014) esittävät tulosten vaihtelevuuden johtuvan hukkaa mittaavien tutkimusten erilaisista tavoista määritellä arvoa tuottamatonta ja arvoa tuottavaa työtä. He arvelevat myös, että eri työtehtävät sisältävät eri määrän hukkaa. Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 1) on kerätty otos kirjallisuuskatsaukseen poimituista, aiemmin tehdyistä, hukkaa mittaavista tutkimuksista. Taulukkoon on eritelty lähde, hukan mittaustapa, tutkittu hukka ja tulokset.

Taulukko 1 Kirjallisuudesta poimitut hukkaa mitanneet tutkimukset

Lähde	Hukan mittausmenetelmä	Mitattu hukka	Tulokset
Lee et al. (1999) Identifying waste: Applications of construction process analysis	Havainnointi	Työryhmän arvoa tuottamaton työaika	42 - 70 %
Christian & Hachey (1995) Effects of Delay Times on Production Rates	Videokuvaus ja työtehtävien kellotus	Työntekijän arvoa tuottamaton työaika	37 %
Kalsaas (2013) Measuring waste and workflow in construction	Havainnointi ja kyselyt työntekijöille	Työryhmän arvoa tuottamaton työaika	25 - 42 %
Gouett et al. (2011) Activity Analysis for Direct-Work Rate Improvement in Construction	Havainnointi	Työryhmällä odottamiseen, liikkumiseen ja henkilökohtaisiin toimiin kulunut aika	40,2 %
Ward & McElwee (2007) Application of the principle of batch size reduction in construction	Havainnointi	Tyhjillään oleva mesta	90 %
Tetik et al. (2018) Impacts of an assembly kit logistic solution in renovation projects: a multiple case study with camera-based measurement	Videokuvaus	Tyhjillään oleva mesta	61,5 - 68,5 %
Pasila (2019) Impact of Lean-Intervention on Productivity	Kypäräkamerat	Työntekijän arvoa tuottamaton työaika	78 %
Salerto (2019) Hukan mittaminen tahtihankkeessa	Videokuvaus	Tyhjillään oleva mesta	76 %
Zhao et al. (2019) Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction	Sisäpaikannus BLE-teknologialla	Työntekijän poissaolo mestalta, alle 10 min läsnäoloja ei huomioitu	64 - 75 %

Taulukosta käy ilmi, kuinka eri hukkaa mitanneiden tutkimusten tuloksissa on paljon eroja. Tämä havainto on linjassa Horman ja Kenley (2005) sekä Kalsaas et al. (2014) tekemien havaintojen kanssa. Taulukossa kuvattujen tutkimusten tulokset eivät kuitenkaan ole sellaisenaan keskenään vertailukelpoisia, vaan kuten taulukossa on esitetty, ne ovat mitanneet osittain erilaisia hukkia ja käyttäneet erilaisia mittausmenetelmiä. Mitatun hukan osalta tut-

kimukset voidaan jakaa työntekijöiden työajan hukkan osuutta mitanneisiin ja mestan tyhjillään oloa mitanneisiin tutkimuksiin, eli hukkaa työn virtauksessa ja tuotteen virtauksessa mitanneisiin tutkimuksiin.

Työn virtauksessa sijaitsevaa hukkaa on taulukkoon poimituissa tutkimuksissa tutkittu havainnoimalla, työntekijöille suunnatuilla kyselyillä, videokuvaamalla, kellottamalla työtehtäviä ja hyödyntäen sisäpaikannusteknologiaa. Lee et al. (1999) mittasivat hukkaa teräspalkkien pystytyksessä kahdella eri työmaalla. He jakoivat työtehtävät arvoa tuottaviin, tarpeellisiin arvoa tuottamattomiin ja tarpeettomiin arvoa tuottaviin tehtäviin. Ensimmäisellä työmaalla teräspalkkien pystytyksessä tarpeellisten ja tarpeettomien arvoa tuottamattomien tehtävien osuus työajasta oli 42 % ja toisella työmaalla 70 %. Eli vaikka hukkaa mitattiin samasta työtehtävästä ja samalla menetelmällä, oli tuloksissa suuri ero. Gouett et al. (2011) mittasivat hukkaa havainnoimalla kuutta eri työmaata. He jakoivat tehtävät tuottaviin ja tuottamattomiin tehtäviin. Tuottaviksi tehtäviksi miellettiin asennustyö, valmisteleva työ, koneisiin ja tarvikkeisiin kuluva työ ja materiaalin käsittely. Tuottamattomiin töihin kuului odottaminen, liikkuminen ja henkilökohtainen aika. Tuottamattomien töiden yhteenlaskettu keskiarvo mitatuista projekteista on taulukossakin ilmoitettu 40,2 % työajasta. Mikäli Gouett et al. (2011) olisivat huomioineet hukaksi kaiken muun, paitsi asennustyön, olisi hukkan keskiarvollinen osuus mitatuissa projekteissa ollut 68,8 %, eli huomattavasti suurempi kuin raportoitu tuottamattomien töiden osuus. Havainnoinnilla ja kyselyillä hukkaa mitannut Kallsaas (2013) jakoi tehtävät asennustyöhön, epäsuoraan työhön, tuotannonohjaukseen, työntekijän henkilökohtaiseen aikaan ja havaittavissa olevaan hukkaan. Havainnoimalla neljää putkiurakoitsijan työntekijää kahtena erillisenä viikkona saatiin havaittavissa olevan hukkan osuudeksi ensimmäiselle viikolle 40 % ja toiselle viikolle 32 % työajasta. Kun näitä neljää urakoitsijaa pyydettiin arvioimaan samalta ajalta oman työnsä hukkan määrää, olivat tulokset ensimmäiseltä viikolta 42 % työajasta ja toiselta viikolta 38 % työajasta. Kysely tehtiin myös suuremmalle joukolle, yhteensä kahdelletoista urakoitsijalle, josta heidän arvioimana hukkan määränä työajasta oli ensimmäiselle viikolle 25 % ja toiselle viikolle 30 %.

Työn virtauksessa ilmenevää hukkaa on mitattu myös videokuvaamalla. Christian ja Hachey (1995) mittasivat betonointitöiden työntekijöiden arvoa tuottamattoman työn osuutta työpäivästä videokuvaamalla ja kellottamalla työtehtäviä. Tehtävät jaettiin arvoa tuottavaan työhön, materiaalien odottamiseen, valvojan odottamiseen ja joutilaana olemiseen. Taulukossa 1 esitetty arvo 37 % on tyypillisen työntekijän arvoista materiaalin odottamiseen, valvojan odottamiseen ja joutilaana olemiseen kulunut osuus työpäivästä. Pasila (2019) mittasi diplomityössään työntekijöiden arvoa tuottamattoman työn osuutta työpäivästä käyttäen työntekijöiden kypärään asennettua kypäräkameraa. Työntekijän työtehtävät jaettiin arvoa tuottaviin, tarpeellisiin arvoa tuottamattomiin ja tarpeettomiin arvoa tuottamattomiin tehtäviin. Arvoa tuottaviksi tehtäviksi luokiteltiin asennustyöt sekä tarkastukset, minkä yhteenlasketuksi osuudeksi työntekijän työajasta saatiin 22 %, jolloin arvoa tuottamattomien töiden osuus oli 78 % työajasta.

Havainnointi ja videokuvaaminen työn virtauksessa sijaitsevan hukkan mittaamisen menetelminä edellyttävät kuitenkin paljon datan manuaalista käsittelyä ja ovat siksi vaikeasti skaalautuvia menetelmiä. Zhao et al. (2019) tutkivat työntekijöiden läsnäoloa mestalla käyttäen hyödyksi BLE-sisäpaikannusteknologiaa. BLE-teknologia (Bluetooth low energy) on langaton tietoliikenneteknologia, jonka avulla on mahdollista paikantaa työntekijän sijainti ja liikkuminen työmaalla. Zhao et al. (2019) esittävät oletuksena, että työntekijältä vaaditaan yli 10 minuutin läsnäolo mestalla, jotta hänen on mahdollista tehdä arvoa tuottavaa työtä. Yli

10 minuutin läsnäolojen osuus mitatusta ajasta oli 25 – 36 %, jolloin arvoa tuottamattoman työajan osuudeksi tutkimuksen tekemillä oletuksilla saadaan 64 – 75 % mitatusta ajasta. Tutkimuksessa esitettiin myös läsnäolojen osuudet yli viiden minuutin ja yli minuutin käynneille. Yli viiden minuutin käynneille läsnäolojen osuudet mestalla olivat 29 – 42 % mitatusta ajasta.

Tuotteen virtauksessa olevaa hukkaa, eli tyhjillään olevaa mestaa on taulukkoon 1 poimituissa tutkimuksissa mitattu havainnoimalla ja videokuvaamalla. Ward ja McElwee (2007) mittasivat hotellihankkeessa hotellihuoneiden käyttöastetta. Havainnoinnin tuloksena hotellihuoneiden käyttöasteeksi saatiin 10 % kokonaistyöskentelyajasta, eli toisin sanottuna hotellihuoneet olivat tyhjillään 90 % työajasta. Salerto (2019) mittasi diplomityössään tahtituotannolla toteutetun kohteen tahtialueiden käyttöastetta videokuvaamalla. Case-kohteessa oli käytössä tahtituotanto, jossa oli viikon tahtiaika ja suuri tahtialue. Mittauksessa tahtialueen käyttöasteeksi saatiin 24 %, eli tahtialue oli tyhjillään 76 % mitatusta ajasta. Tetik et al. (2018) mittasivat huoneittain toimitettavien materiaalitoimitusten vaikutusta mestan käyttöasteeseen videokuvaamalla mesteja. Mestan käyttöasteeksi logistiikkaratkaisusta riippuen saatiin 31,5 – 38,5 % mitatusta ajasta, mikä tarkoittaa mestan olleen tyhjillään 61,5 – 68,5 % mitatusta ajasta. Tetik et al. (2018) mestan käyttöasteen laskentatapa poikkeaa Ward ja McElwee (2007) sekä Salerto (2019) laskentatavasta eikä täten ole vertailu kelpoinen arvo näiden tutkimusten kanssa. Tetik et al. (2018) mittauksessa laskenta aloitettiin päivän ensimmäisestä arvoa tuottavasta työstä ja lopetettiin päivän viimeiseen arvoa tuottavaan työhön. Tällä välillä tapahtunut mestan käyttö summattiin yhteen ja jaettiin päivän viimeisen arvoa tuottavan työn ja ensimmäisen arvoa tuottavan työn ajankohtien erotuksella, kun taas Ward ja McElwee (2007) ja Salerto (2019) vertailuarvona toimi koko mitattu työaika riippumatta siitä, oliko mestalla käyty heti ensimmäisellä hetkellä työpäivän alkaessa.

Eri hukkaa mitanneiden tutkimusten tuloksissa on siis paljon vaihtelua riippuen käytetystä mittaamenetelmästä, mitatusta hukasta ja mitattavasta kohteesta. Tämän vaihtelun vuoksi vertaillen erilaisten hukkaa mitanneiden tutkimusten tuloksia keskenään, tulee tulosten vertailukelpoisuuteen suhtautua varauksella. Taulukkoon 1 kerätyt tutkimukset ja niiden tulokset eivät itsessään anna vertailukelpoista tietoa hukan nykytilanteesta, vaan tutkimusten eroavaisuudet esimerkiksi menetelmissä, hukan määritelmässä ja mitatussa hukassa tulee käydä tarkasti läpi.

Tässä luvussa käsiteltiin hukkaa sen määritelmien, eri hukkatyyppien, WIP:in ja hukan mitaamisen kautta. Tämän diplomityön tavoitteiden kannalta on tärkeää luoda käsitys siitä, mitä hukka on ja miten sitä voidaan mitata. Hukan määriteltiin olevan mitä vain toimintaa, joka ei edistä yrityksen liiketoimintaa, eli toiminnan ollessa arvoa tuottamatonta työtä (Shingo 1989, s. 76). Työn virtauksessa hukkaa voi ilmetä monessa eri muodossa ja sitä voi olla hankalaa tunnistaa, mutta perusteltuna oletuksena voidaan kuitenkin pitää Zhao et al. (2019) esittelemää oletusta siitä, että työntekijä ei voi tehdä arvoa tuottavaa työtä, mikäli hän ei ole läsnä mestalla. Tuotteen virtauksessa hukka ilmenee tyhjillään olevana mestana, eli odottamisena. Tällöin hukka on odottamisen muodossa, jossa työ odottaa työntekijää. Tämä hukan muoto ilmenee työmaalla yleensä tarpeettomana WIP:inä (Formoso et al. 1999). Työn virtauksessa sijaitsevaa hukkaa voidaan työmaalla havaita tarkkailemalla työntekijää ja tuotteen virtauksessa olevaa hukkaa voidaan havaita tarkkailemalla tuotetta, eli mestaa. Seuraavassa luvussa perehdytään diplomityön tavoitteen kannalta toiseen oleelliseen teemaan, eli tahtituotantoon. Luvussa syvennytään tahtituotannon menetelmään, jonka jälkeen menetelmää tarkastellaan tässä luvussa käsitellyn hukan näkökulmasta.

5 Tahtituotanto

5.1 Tahtituotannon tausta

Tahtituotanto on alun perin lähtöisin valmistavasta teollisuudesta ja sen alkuperäisenä tavoitteena on ollut tahdistaa tuotantonopeus asiakkaan kysynnän mukaan (Heinonen & Seppänen 2016). 1900-luvun alussa tahtituotannon käyttö lisääntyi valmistavassa teollisuudessa. Yhtenä esimerkkinä tahtituotantoa hyödyntäneistä henkilöistä on Henry Ford, joka käytti tahtituotantoa vuonna 1913 ja mahdollisti T-Fordin nopeamman ja halvemmän koostamisen verrattuna muihin autoihin tuohon maailman aikaan. Womack ja Jones (1996) yhdistivät tahdin, TPS:ää kuvailevassa kirjassaan, virtaukseen ja imuohjaukseen. Toyotan tuotantomallia kuvaavassa graafissa tahtiaika onkin keskeisellä paikalla, JOT-pilarissa (englanniksi just-in-time). (Haghsheno et al. 2016.)

Tahtiajalla tarkoitetaan ajanyksikköä, jonka aikana yksi tuote pitää valmistaa vastatakseen tuotteen kysynnän tasoon. Autoteollisuudessa tahtiaika on perinteisesti minuuteissa. Tahtituotanto on edelleen olennainen osa sekä Toyotan että monen muun valmistavan teollisuuden yrityksen toimintamallia. (Haghsheno et al. 2016.) Onkin todettu, että jatkuvalla imu-
tuotannolla saadaan aikaan tuotannon tehokkain suoritus, tämä voidaan saavuttaa tahtiaikataululla. (Binner et al. 2016). Tahtiaikataulussa työvaiheet mitoitetaan saman kestoisiksi. Tämän tarkoituksena on löytää työvaiheet, jotka ovat tuotannon pullonkaulana. On esitetty, että mikään työvaihe ei saa edetä pullonkaulaa nopeammin, koska silloin se ei tuota tuotteelle lisäarvoa vaan tarpeetonta WIP:iä. (Faloughi et al. 2015.)

Rakennusallalla ensimmäinen tiedossa oleva tahtituotannon periaatteita noudattanut rakennettu rakennus oli Empire State Building New Yorkissa vuonna 1930. Tahtia on rakentamisessa käytetty kohteissa, joissa toistuvuus on suurta, koska nähdään, että tahtituotanto sopii hyvin kohteisiin, joissa on paljon toistuvuutta. Tahtituotannon käyttö rakennushankkeissa on kuitenkin ollut vielä vähäistä. Tämä saattaa esimerkiksi johtua siitä, että kerrokset ja huoneet eroavat yleensä ainakin hieman toisistaan. Jokaista projektia pidetään uniikkina ja toistuvuutta on usein vaikeaa tunnistaa. Kuitenkin tarkastelemalla tarkemmin, toistuvuutta löytyy usein jokaisesta kohteesta. Esimerkiksi asunnoissa on lähes aina ainakin yksi huone ja yksi kylpyhuone, joissa työvaiheet toistuvat asunnosta toiseen. (Haghsheno et al. 2016.) Kansainvälisen Lean-rakentamisen yhteisössä (IGLC), tahtituotanto tuotiin ensimmäisen kerran esille vuonna 2003 (Horman et al. 2003).

5.2 Tahtisuunnittelu

Tahtisuunnittelulla tarkoitetaan tahtiaikataulun luomista, eli tahtituotannolla toteutettavan kohteen aikataulusuunnittelua. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia tapoja suunnitella tahtiaikataulua (mm. Dlouhy et al. 2016; Heinonen & Seppänen 2016; Binner et al. 2017; Tommelein 2017). Kaikissa esitellyissä tahtisuunnittelun tavoissa kuitenkin pääperiaatteet ovat samat: tunnistetaan työvaiheiltaan ja työmääriltään samankaltaiset alueet, määritetään työvaiheet sekä niiden etenemisjärjestys ja määritetään työvaiheiden etenemisnopeus matalalta toiselle. Työvaiheiltaan ja työmääriltään samankaltaisista alueista tai niitä yhdistelemällä muodostetaan tahtialue. (mm. Binner et al. 2017; Tommelein 2017). Tommelein (2017) kuvaaman menetelmän mukaan tahtiaika määritellään hitaimman työvaiheen mukaan, mutta Binner et al. (2017) kuvaamassa menetelmässä sekä Heinonen ja Seppänen (2016) hyttiremonteissa käytetyssä menetelmässä tahtiaika määritellään tilaajan määrittämän luovutusajankohdan perusteella käytettävissä olevan ajan mukaan. Yhdistelemällä tai

jakamalla työvaiheita, muodostetaan työpaketit, eli tuotantojunan vaunut. Tämä tuotantojuna etenee ennalta määrättyssä järjestyksessä tahtialueelta toiselle, vaihtaen tahtialuetta aina tahtiajan päättyessä. (Haghsheno et al. 2016).

Tahtituotantoa on kirjallisuudessa vertailtu vaihtoehtoisiin sijaintipohjaisiin aikataulusuunnitteluun, kuten LBMS-menetelmään (Seppänen 2014; Frandson et al. 2015). Suunnittelun osalta suurimpana erona nähdään puskureiden käyttö. Tahtituotanto priorisoi kapasiteettipuskureiden käyttöä, kun taas LBMS-menetelmä priorisoi kiinteiden aikapuskureiden käyttöä. Molempien menetelmien kuvataan kuitenkin käyttävän näiden puskureiden lisäksi tilapuskureita ja varamestasta muodostuvia puskureita. Varamestalla tarkoitetaan tässä yhteydessä aikataulusuunnittelun ulkopuolelle jätettyä aluetta, joka ei ole aikataulullisesti niin kriittinen, vaan siellä voidaan työskennellä, mikäli työryhmä on edennyt muilla mestoilla suunniteltua nopeammin. (Frandson et al. 2015).

5.3 Tahtiohjaus

Kun kaikki työvaiheet tulevat peräkkäin imussa ilman kiinteitä aikapuskureita, on työnaikainen ohjaaminen avainasemassa (Haghsheno et al. 2016). Tahtituotannossa tuotannon työnaikainen ohjaaminen tapahtuu tahtiohjauksella. Tahtiohjauksella tarkoitetaan tahtiaikataulun lyhyen aikavälin seuranta ja mahdollisten ohjaustoimenpiteiden tekemistä (mm. Frandson et al. 2015; Heinonen & Seppänen 2016; Binninger et al. 2017). Tahtituotantomallien menetelmäkuvauksissa on esitelty erilaisia ohjaustoimenpiteitä, joilla tuotannon poikkeamiin voidaan reagoida. Frandson et al. (2015) esittävät, että tuotantoa tulee seurata tahtiaikaa tiheämmin, jotta mahdollisiin myöhästymisiin voidaan reagoida ennen tahtiajan päättymistä. Onkin esitetty, että mitä pienempi tahtialue on, sitä tiheämmin tarkastuksia ja aikatauluseuranta tulisi tahtituotannossa tehdä (Binninger et al. 2016). Binninger et al. (2017) kuvaavat monia tahtiohjauksen ohjaustoimenpiteitä, kuten esimerkiksi ongelmallisen tahtialueen siirtämisen myöhemmäksi tai tuotantojunan pysäyttäminen tuotannossa ilmenneen ongelman ratkaisemisen ajaksi. Mahdollisia viivästyksiä voidaan kuroa kiinni myös neuvomalla työryhmää työskentelytavassa, vaihtamalla tai siirtämällä resursseja vaunuun tai siirtämällä työvaiheita kiireisestä vaunusta ei niin kiireiseen vaunuun (Heinonen & Seppänen 2016). Toisaalta nämä Heinosen ja Seppäsen (2016) kuvaamat toimenpiteet ovat olleet huomattavasti helpommin toteutettavissa heidän kuvaamissaan hyttiremonteissa, joissa erikoistuneet aliurakoitsijat eivät rajoita resurssien tai työvaiheiden siirtelyä vaunusta toiseen niin paljon. Rakennushankkeissa juuri erikoistuneiden aliurakoitsijoiden onkin todettu hankaloittavan työkuormien tasaamista urakoitsijoiden kesken (Salem et al. 2018).

Tahtituotannon aikataulun seuraaminen ja ohjaaminen toteutetaan päivittäisjohtamisen palavareissa (mm. Frandson & Tommelein 2016; Haghsheno et al. 2016; Heinonen & Seppänen 2016; Kujansuu et al. 2019). Päivittäisjohtamisen palaverit voidaan pitää joko työmaatoimistolla tai työmaalla, tahtiohjaukseen tarkoitettulla pisteellä. Pääurakoitsijan työnjohtajan pitämässä palaverissa päivitetään tuotannon tilannekuva ja tehdään mahdollisia ohjaustoimenpiteitä. Eri vaunujen nokkamiehet osallistuvat päivittäisjohtamisen palaveriin, mikä tekee ohjaustoimenpiteiden toteuttamisesta helpompaa nopean informaation välittymisen kautta. (Haghsheno et al. 2016.) Kujansuu et al. (2019) mukaan päivittäisjohtamisen palaverit ollaan nähty tahtituotannolla toteutettavissa kohteissa potentiaalisena tapana aloittaa työpäivä. Hyttiremonteissa hyödynnetyssä tahtituotantomallissa aikataulun seurantalpalavereita pidetään myös päivittäin. KPI:t (Key Performance Indicator), eli tuotannon suorituskyvyn mittarit, määritellään projektikohtaisesti ja niitä seurataan jatkuvasti. Mikäli tuotannossa havaitaan poikkeamia, niiden juurisyyt analysoidaan välittömästi ja korjaavien toimenpiteiden

jälkeen tehdään jälkimittaukset, joilla toimenpiteen vaikutus todetaan. (Heinonen & Seppänen 2016.)

Rakennushankkeen aikataulun ohjauskeinot ja seuraamistavat riippuvat hankkeessa käytössä olevasta aikataulumenetelmästä. Perinteisesti johdettavassa, kriittisen polun –menetelmään pohjautuvassa, rakennustuotannossa tuotannonohjauksen kuvataan toteutuvan termos-taatin tavoin, eli reaktiivisesti. Myöhästymisiin reagoidaan niiden ilmettyä lisäämällä työ-maalle työntekijöitä, mikä vaikuttaa heikentävästi koko projektin tuottavuuteen. (Koskela et al. 2002.) Sijaintipohjaisten aikataulutuksen menetelmien, kuten LBMS-menetelmän ja tahtituo-tannon aikataulun ohjaustavat ovat proaktiivisempia, eli ohjausmenetelmien tavoitteena on ratkaista tuotannossa ilmenevät aikataululliset poikkeamat ennen kuin ne aiheuttavat viiväs-tyksiä aikatauluissa. LBMS-menetelmässä aikataulun seuraaminen ja ohjaus tapahtuvat pää-urakoitsijan toimesta. Pääurakoitsija seuraa työvaiheiden etenemistä täyttämällä toteumatietoja aikatauluohjelmaan, joka jatkuvasti ennustaa mahdollisia ongelmia tulevassa tuotannossa. Pääurakoitsijan havaittua ongelman ennusteessa, ratkaistaan se yhdessä aliurakoitsijoiden kanssa. Tahtituotannossa taas tuotannon tilannekuvaa päivitetään jatkuvasti aliurakoitsijoi-den toimesta. Tahtiaikataulu visualisoidaan esimerkiksi työmaan seinälle sijoitettavalla sel-keällä aikataululla, josta käy ilmi kuka on töissä missä ja milloin. Seuranta tehdään tähän aikatauluun päivittäisjohtamisen palavereissa. (Frandsen et al. 2015.)

5.4 Tahtituotannon hyödyt

Kirjallisuudessa esitetyt tahtituotannon myötä saavutetut hyödyt painottuvat usein projektin läpimenoajan lyhennyksiin (mm. Frandsen & Tommelein 2014; Faloughi et al. 2015; Bin-ninger et al. 2018). Alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) on esitetty kirjallisuudesta poi-mittuja tutkimuksia, jotka ovat käsitelleet tahtituotannon avulla saavutettuja hyötyjä läpime-noaikojen lyhennyksissä. Läpimenoaikojen lyhennyksen osalta suurimmat hyödyt on saavu-tettu kohteissa, joissa tahtiaika on ollut muita kohteita huomattavasti lyhyempi: Heinosen ja Seppäsen (2016) kuvailemassa tuotannossa käytettiin 25 minuutin tahtiaikaa ja Binninger et al. (2018) kuvailemassa tuotannossa käytettiin tahtiaikana yhtä tuntia. Onkin esitetty, että mitä lyhyempi tahtiaika tuotannolla on, sitä tehokkaammin se voi toimia (Haghsheno et al. 2016).

Taulukko 2 Kirjallisuudesta poimittuja tutkimuksia, jotka käsittelevät tahtituotannon avulla saavutet-tuja hyötyjä läpimenoaikojen lyhennyksissä

Lähde	Saavutetut hyödyt
Frandsen & Tommelein (2014) Automatic generation of a daily space schedule	14 % lyhennys läpimenoajassa, parantunut tilannekuva työntekijöille
Faloughi et al. (2015) Wip design in a construction project using takt time planning	20 % lyhennys läpimenoajassa
Binninger et al. (2018) Short Takt time in construction—a practical study	70 % lyhennys läpimenoajassa, läpinäkyvämpi tuo-tanto

Dlouhy et al. (2016) Three-level Method of Takt Planning and Takt Control –A New Approach For Designing Production System in Construction	55 % lyhennys läpimenoajassa, läpinäkyvämpi tuotanto
Frandsen et al. (2013) Takt time planning for construction of exterior cladding	50 % lyhennys läpimenoajassa, selkeämmät päivittäiset tavoitteet työntekijöille
Heinonen & Seppänen (2016) Takt time planning in cruise ship cabin refurbishment: Lessons for lean construction	73 % lyhennys läpimenoajassa, 380 % tuottavuuden kasvu, 99 % vähemmän WIP:iä, 99 % vähemmän laatuvirheitä

Lyhentyneiden läpimenoaikojen lisäksi tahtituotannolla on saavutettu muitakin hyötyjä. Binnering et al. (2018) sekä Dlouhy et al. (2016) mainitsevat tahtituotannolla saavutetuksi hyödyksi läpinäkyvämmän tuotannon. Tuotanto on läpinäkyvämpää, koska tahtiaikataululla visualisoidaan missä kukin työryhmä kunakin päivänä työskentelee. Samoja teemoja nostaa esille Frandsen ja Tommelein (2014) sekä Frandsen et al. (2013) esittämällä tahtituotannon avulla saavutetuksi hyödyksi työntekijöiden parantuneen tilannekuvan tuotannosta ja päivittäisten tavoitteiden selkeyden. Lisäksi Østnor et al. (2018) sekä Haghsheno et al. (2016) esittävät tahtituotannon tekevän tuotannosta stabiilimman. Stabiiliudella tarkoitetaan vakautta ja sitä, että tuotanto ei ole niin herkkä vaihtelun vaikutuksille. Haghsheno et al. (2016) kuvaavat tuotannon parantuneen stabiiliuden syntyvän tiuhasti tapahtuvan tahtiohjauksen avulla.

Läpinäkyvämmän tuotannon, parantuneen tilannekuvan, selkeiden tavoitteiden ja stabiilimman tuotannon lisäksi suoria hyötyjä työntekijälle on kirjallisuudessa esitetty melko vähän, mutta Vatne ja Drevland (2016) kuvaavat työntekijöiden odottamiseen kuluneen ajan vähentyneen. Odottamisen vähentymisen kautta työntekijöiden ansaintatason esitetään nousseen noin 18 % verrattuna tavanomaiseen projektiin. Kun aikaa ei kulunut odottamiseen, pystyivät työntekijät tekemään enemmän tuottavaa työtä, mikä johti suurempaan ansioon työntekijöiden työskennellessä yksikköhintoihin perustuvalla sopimuksella. Fiallo ja Howell (2012) kuvaavat tahtituotannon mahdollistaneen 37,5 % parannuksen työryhmän viikoittaisessa työsaavutuksessa. He esittävät myös tahtituotannon tehneen ylituotannon ja odottamisen muodossa olevista hukista näkyvämpiä, jolloin niitä oli helpompi vähentää. Seuraavassa alaluvussa paneudutaankin syvemmin juuri hukan ja tahtituotannon väliseen yhteyteen.

5.5 Hukka tahtituotannossa

Tahtituotantoa käsittelevissä tutkimuksissa hukkaa ei ole juurikaan tutkittu, eikä varsinkaan mitattu. Salerron (2019) diplomityö, jossa tahtituotannossa ilmenevää hukkaa mitattiin tahtitietojen käyttöasteen avulla, on ainoa kirjallisuuskatsauksessa löydetty tutkimus, joka selkeästi keskittyy hukan mittaamiseen tahtituotannossa. Tahtituotannon tunnistettiin kuitenkin vaikuttaneen odottamisen sekä ylituotannon muodossa oleviin hukkiin, mutta tarkempaa mittausta tai selvitystä aiheesta ei ollut tehty (Fiallo & Howell 2012; Vatne & Drevland 2016). Puutteellisen, hukkaa tahtituotannossa käsittelevän, kirjallisuuden vuoksi tässä alaluvussa pyritään yhdistelemään tahtituotannon ominaisuuksia ja sillä saavutettuja hyötyjä hukkaan. Tämän diplomityön tavoitteen kannalta on oleellista tunnistaa tahtituotannon vaikutukset työn ja tuotteen virtauksessa sijaitseviin hukkiin, joten aiheeseen paneudutaan näiden kahden virtauksen kautta.

Tahtituotannon avulla saavutetut projektien läpimenoaikojen lyhennykset viestivät paremmasta tuotteen virtauksesta, eli vähentyneestä hukasta tuotteen virtauksessa. Hukka tuotteen virtauksessa ilmenee tyhjillään olevana tilana, eli tarpeettomana WIP:inä, joko eri työvaiheiden välillä tai yksittäisen työvaiheen sisällä (Formoso et al. 1999; Faloughi et al. 2015). Sacks et al. (2017) ovat esittäneet tuotteen virtauksen parantuvan tahdistamalla työvaiheet etenemään samalla vauhdilla mestalta toiselle, pienentämällä tuotannossa käytettävää eräkokoa ja minimoimalla kiinteitä aikapuskureita työvaiheiden välissä. Tahtituotannossa työvaiheet tahdistetaankin etenemään samalla vauhdilla mestalta toiselle, ohjataan käyttämään pientä eräkokoa ja käytetään kiinteiden aikapuskureiden sijaan kapasiteettipuskureita (mm. Frandson et al. 2015; Binnering et al. 2017; Tommelein 2017). Suurimmat läpimenoajan lyhennykset, eli parannukset tuotteen virtauksessa, ollaankin saavutettu tahtituotannoilla, joissa erä koko on ollut pienin (Heinonen & Seppänen 2016; Binnering et al. 2018).

Kapasiteettipuskureiden käyttö saattaa kuitenkin ajaa heikentyneeseen työn virtaukseen. Howell et al. (2001) ovatkin esittäneet, että työryhmien työkuormien alimitoittaminen, eli kapasiteettipuskureiden käyttö, nopeuttaisi projektin läpimenoaikaa, mutta heikentäisi työntekijöiden tuottavuutta. Tämä on selitettävissä Hopp ja Spearman (2011, s. 309) esittelemän puskuroinnin lain avulla, jonka mukaan tuotantoa, jossa on vaihtelua, tulee puskuroida tilapuskureilla, kapasiteettipuskureilla, aikapuskureilla tai niiden yhdistelmillä. Rakentamisen tuotannon sisältäessä vaihtelua, puskuroinnin kapasiteettipuskureilla voidaan päätellä johtavan siihen, että työntekijä joutuu jossain tilanteessa todennäköisesti siirtymään varamestalle tai odottelemaan työtään, mikä laskee hänen tuottavuuttaan. Kun taas puskurointi vaihtelua vastaan aikapuskureilla aiheuttaa todennäköisesti tilanteita, joissa tila on tyhjillään, eli työ odottaa työntekijää. Seppänen (2014) on kritisoinut kapasiteettipuskureiden käyttöä niiden vaatiman suuren varamestan vuoksi. Mikäli tuotannossa on paljon vaihtelua, vaatii työvaiheet paljon varamestaa, jossa ne voivat työskennellä odottaessaan seuraavalle mestalle pääsyään. Mikäli suuri vaihtelu johtaa kapasiteettipuskureilla puskuroidussa tuotannossa suureen varamestojen tarpeeseen, voidaan silloin myös päätoimisten tilojen, eli esimerkiksi tahtituotannossa tahtialueiden, olevan paljon tyhjillään.

Jotta kapasiteettipuskureilla puskuroitua tahtituotantoa voidaan ilman kohtuuttomia varamestoja toteuttaa, tulee tuotannossa hallita vaihtelua muunlaisin keinoin. Tiheästi tapahtuvan tahtiohjauksen avulla tuotantomäärissä tapahtuva vaihtelu havaitaan nopeasti ja korjauksia toimenpiteitä voidaan tehdä ennen sen haitallisia vaikutuksia tuotantoon (Frandson et al. 2015). Myös Haghsheno et al. (2016) kuvaavat tiheästi tapahtuvan tahtiohjauksen tekevän tuotannosta stabiilimpaa, minkä voidaan päätellä johtuvan tahtiohjauksen vaikutuksesta vaihteluun. Aihetta ei ole empiirisesti todistettu, mutta pohdintana näiden lähteiden pohjalta voidaan esittää ajatus siitä, että tiheästi tapahtuvalla tahtiohjauksella voitaisiin vähentää tuotannossa esiintyvää vaihtelua.

Tahtituotannon avulla saavutettuna hyötynä on myös esitetty läpinäkyvämpi tuotanto, parempi tilannekuva työntekijöille ja työntekijöiden selkeät päivittäiset tavoitteet (Frandson et al. 2013; Frandson & Tommelein 2014; Dlouhy et al. 2016; Binnering et al. 2018). Brodetskaia & Sacks (2007) totesivatkin epäselvän tilannekuvan ja lyhyen aikavälin tuotannonohjauskeinojen puutteen johtaneen siihen, että työntekijät joutuivat keskenään neuvottelemaan millä mestalla kukin työskentelee ja etsimään itselleen mestaa liikkumalla ympäri työmaata. Tämä aiheutti tuotantoon vaihtelua sekä tarpeettoman liikkeen muodossa olevaa hukkaa.

Mikäli tahtituotannossa on siis onnistunut tahtiohjaus ja tuotantosuunnitelman selkeä ja ajantasainen visuaalinen esitys kaikkien saatavilla, voidaan vaihtelun sekä huonosta tilannekuvasta johtuvan tarpeettoman liikkeen olettaa vähentyvän.

Sekä tahtituotanto että LBMS-menetelmä pyrkivät hyvään tuotannon virtaukseen (Fransson et al. 2015). Vaihtelun vallitessa täydellistä tuotannon virtausta on kuitenkin mahdotonta saavuttaa, koska tuotantoa tulee suojata vaihtelulta käyttämällä puskureita (Hopp ja Spearman 2011, s. 309). LBMS-menetelmä priorisoi kiinteiden aikapuskureiden käyttöä, kun taas tahtituotanto priorisoi kapasiteettipuskureiden käyttöä. Priorisoimalla aikapuskureiden käyttöä priorisoidaan työn virtausta ja priorisoimalla kapasiteettipuskureiden käyttöä priorisoidaan tuotteen virtausta. Yksinkertaistettuna voidaan siis LBMS-menetelmässä odottaa ilmenevän enemmän hukkaa tyhjän mestan muodossa ja tahtituotannossa enemmän hukkaan kuluvaan aikaan työntekijän työpäivän aikana. Tahtituotannolla on kuitenkin saavutettu parannuksia myös työn virtauksessa (Fiallo & Howell 2012; Vatne & Drevland 2016), joten todellisuudessa asia ei ole näin yksinkertainen. Minimoidessa kiinteiden aikapuskureiden käyttöä, ja sen sijaan puskuroimalla tuotantoa kapasiteettipuskureilla, vaihtelun voidaan olettaa vähentyneen tiheään tapahtuvan tahtiohjauksen johdosta, mikäli myös työn virtausta on onnistuttu parantamaan.

6 Kirjallisuuskatsauksen yhteenveto

Kirjallisuuskatsauksessa paneuduttiin tutkimuksen taustassa esitellyn rakentamisen teollisuudenalan tuottavuusongelman syihin etsimällä kirjallisuudesta tietoa nykyrakentamisen ongelmista, joita kuvattiin luvussa 2. Kirjallisuuden perusteella esille nousi seuraavia ongelmia: pitkälle erikoistuneiden aliurakoitsijoiden kautta tullut tuotannon joustamattomuus, projektien osaoptimointi, työntöohjattu tuotanto, aikataulun reaktiivinen ohjaus, työtehtävien aloitukseen keskittyminen ja suuret eräkoot (Koskela et al. 2002; Forsberg & Saukkoriipi 2007; Ward & McElwee 2007; Binninger et al. 2016; Salem et al. 2018).

Kuten jo aikaisemmin on todettu, Lean-rakentamista on esitetty keinona ratkaisemaan alan huonoon tuottavuuteen liittyviä ongelmia (Koskela et al. 2002). Luvussa 3 perehdyttiinkin Lean-filosofiaan ja siihen pohjautuvaan Lean-rakentamiseen. Kirjallisuuden pohjalta huomattiin, että Lean-filosofian ydinajatus kiteytyy tuotannon tehostamiseen ja sitä kautta tuottavuuden parantamiseen minimoimalla tuotannossa esiintyvää hukkaa (Bajjou & Chafi 2018). Esille nostettiin myös, että IGLC:n piirissä on ryhmän perustamisesta lähtien ajateltu rakentamisen prosessia työn virtauksena, joka tuottaa arvoa asiakkaille (Bertelsen et al. 2006). Luvussa perehdyttiin virtauksen käsitteeseen syvemmin ja huomattiinkin virtauksen ja Lean-filosofian perusajatuksen, eli hukan eliminoinnin välillä oleva suora yhteys: virtaus on sitä parempi, mitä vähemmän siinä on arvoa tuottamattomia tehtäviä, eli hukkaa. Ajatus pätee myös toisin päin: prosessissa on sitä vähemmän hukkaa, mitä parempi virtaus siinä on. Kirjallisuuden pohjalta tunnistettiin myös, että rakentamisessa on monia eri virtauksia, kuten aloitusedellytysten virtaukset (Koskela 2000) ja tuotannon virtaukset (Sacks 2016). Tutkittaessa tuotannossa ilmenevää hukkaa, on tuotannon virtaukset, eli työn ja tuotteen virtaus, avainasemassa. Tämä teema toimikin viitekehyksenä lopulle kirjallisuuskatsaukselle, kun seuraavia teemoja pohdittiin työn ja tuotteen virtauksen näkökulmista.

Luvussa 3 käsiteltiin myös yhtenä olennaisena teemana tuotannossa esiintyvää vaihtelua. Vaihtelun todettiin olevan tunnistettu haaste rakentamisessa ja sen tuhoisia vaikutuksia vastaan tulee tuotannossa suojautua käyttämällä erilaisia puskureita (Tommelein et al. 1999; Hopp & Spearman 2011, s. 309; Farag 2014). Hopp ja Spearman (2011, s. 309) esittelemän puskuroinnin lain mukaan, tuotantoa voidaan suojata vaihtelua vastaan käyttämällä puskurina joko tilaa, aikaa, kapasiteettia tai näiden yhdistelmiä. Näistä puskureista kapasiteettipuskurin tunnistettiin priorisoivan tuotteen virtausta ja aikapuskurin priorisoivan työn virtausta (Howell et al. 2001).

Virtauksen ja vaihtelevuuden jälkeen oli luonnollista siirtyä käsittelemään tarkemmin hukkaa käsitteenä luvussa 4. Hukan on Lean-filosofian mukaisesti määritelty olevan mitä vain toimia, jotka eivät edistä yrityksen liiketoimintaa, eli ovat arvoa tuottamattomia (Shingo 1989, s. 76). Hukkaa rakentamisessa tutkineet tutkimukset ovat kuitenkin kuvanneet hukkaa eri tavoin, riippuen tutkimuksen lähestymiskulmasta aiheeseen (mm. Formoso et al. 1999; Forsberg & Saukkoriipi 2007). Myös erilaisten hukkien, eli hukkatyyppien, jaottelussa on aiemmin tehdyissä tutkimuksissa eroja. Koskela et al. (2013) ovat kritisoineet paljon siteeratun Ohnon Seitsemän hukan soveltuvuutta rakennusosalalle ja ehdottavatkin, että Koskelan (2004) esittelemä making-do –hukka tulisi lisätä jaotteluun ja että se on yksi rakentamisen tärkeimmistä hukista. Hukkatyypit esiteltiin Formoso et al. (1999) tekemän jaottelun avulla, koska se pohjautuu alkuperäiseen Seitsemään hukkaan, mutta sitä on täydennetty tutkimusryhmän työmaalla suoritettujen empiiristen havaintojen pohjalta. Tämän listauksen lisäksi haluttiin vielä nostaa esille Aslesen et al. (2019) esittämä näkemys siitä, että myös tila on hukkaa pohtiessa hyvä tunnistaa yhtenä resurssina.

Luvussa 4 esiteltiin erikseen myös WIP, jota ei nähdä suoraan hukan kategorisoinneissa yhtenä hukkatyyppinä, mutta voisi toisaalta olla yhdistettynä esimerkiksi varastointiin tai odottamiseen. Formoso et al. (1999) esittävät, että ylituotannon muodossa oleva hukka johtaa tarpeettomaan WIP:iin. Odottamisen muodossa WIP voitaisiin taas nähdä, kun WIP on liian suuri ja mestat ovat tyhjillään ja resurssit, eli tässä tapauksessa tilat, odottavat seuraavaa työntekijää. WIP voidaan nähdä myös liikana varastona, eli ikään kuin keskeneräisiä huoneita on tehty varastoon, odottamaan seuraavien työvaiheiden saapumista. Faloughi et al. (2015) on määritellyt WIP:in erilaiset ilmenemismuodot ja he esittävät myös, että rakennustuotannossa WIP:in rajoittamisella voidaan vähentää odottamisen muodossa olevaa hukkaa, jossa työ odottaa työntekijää, eli hukkaa tuotteen virtauksessa.

Kirjallisuuden pohjalta tutustuttiin myös hukan mittaamiseen, hukkaa mitanneiden, aiemmin tehtyjen tutkimusten kautta. Huomattiin, että rakentamisessa hukkaa mitanneiden tutkimusten tuloksissa on paljon vaihtelua johtuen eri mittausmenetelmistä, mitatuista hukista ja mitattavasta kohteesta. Näitä samoja havaintoja on tehty myös Horman ja Kenley (2005) sekä Kalsas et al. (2014) tekemissä tutkimuksissa. Hukkaa mitanneita tutkimuksia käsiteltiin tarkemmin jakaen ne hukkaa työn virtauksessa mitanneisiin ja hukkaa tuotteen virtauksessa mitanneisiin tutkimuksiin. Jaottelun pohjalta huomattiin, että hukkaa työn virtauksessa mitanneet tutkimukset ovat keskittyneet tarkkailemaan työntekijöitä ja hukkaa tuotteen virtauksessa mitanneet tutkimukset ovat keskittyneet tarkkailemaan mestaa.

Luvussa 5 käsiteltiin tahtituotantoa sen taustan, tahtisuunnittelun ja tahtiohjauksen kautta. Kirjallisuuden pohjalta huomattiin, että tahtituotanto juurtaa juurensa Lean-filosofian alkuperään, eli TPS:ään ja tahtiaika onkin toiminut Toyotan tuotannossa keskeisessä roolissa (Haghsheno et al. 2016). Tahtisuunnittelun osalta huomattiin, että kirjallisuudessa on kuvattu monia erilaisia tapoja suunnitella tahtiaikatauluja (mm. Dlouhy et al. 2016; Heinonen & Seppänen 2016; Binniger et al. 2017; Tommelein 2017). Yhdistävänä tekijänä kaikissa suunnittelumalleissa kuitenkin tunnistetaan työvaiheiltaan ja työmääriltään samankaltaiset alueet, määritetään työvaiheet sekä niiden etenemisjärjestys ja määritetään työvaiheiden etenemisnopeus mestalta toiselle, eli tahtiaika. Työvaiheiltaan ja työmääriltään samankaltaisista alueista tai niitä yhdistelemällä muodostetaan tahtialue, joiden läpi työpaketit kulkevat ennalta määrättyssä järjestyksessä. Aikataulun suunnittelun osalta suurimpana erona LBMS-menetelmään tunnistettiin puskureiden käyttö. Tahtiaikataulu priorisoi kapasiteettipuskureiden käyttöä ja LBMS-menetelmä priorisoi aikapuskureiden käyttöä (Frandsen et al. 2015).

Tahtiohjauksen tunnistettiin olevan tärkeässä roolissa tahtituotannossa. Haghsheno et al. (2016) esittääkin, että kun tuotannossa minimoidaan kiinteiden aikapuskureiden käyttö, on työnaikainen tuotannonohjaus tärkeässä roolissa. Kirjallisuudessa on esitelty erilaisia ohjaustoimenpiteitä tahdin aikaiseen tuotannonohjaamiseen (mm. Frandsen et al. 2015; Heinonen & Seppänen 2016; Binniger et al. 2017). Monissa tutkimuksissa nousi kuitenkin esille tahtiohjauksen tapahtuvan työnjohtovetoisessa päivittäisjohtamisen palaverissa (mm. Frandsen & Tommelein 2016; Haghsheno et al. 2016; Heinonen & Seppänen 2016; Kujansuu et al. 2019).

Luvussa 5 käsiteltiin myös tahtituotannolla saavutettuja hyötyjä. Saavutettujen hyötyjen raportoinnin huomattiin kirjallisuudessa painottuvan projektien läpimenoaikojen lyhennyksiin (mm. Frandsen & Tommelein 2014; Faloughi et al. 2015; Binniger et al. 2018). Suurimmat läpimenoaikojen lyhennykset oli saavutettu projekteissa, joissa tahtiaika oli ollut lyhyt ja näin ollen tuotannossa käytössä ollut eräkokoo oli ollut pieni (Heinonen & Seppänen 2016;

Binninger et al. 2018). Muita tahtituotannon avulla saavutettuja hyötyjä oli esitetty olevan tuotannon läpinäkyvyyden parantuminen, parantunut työntekijöiden tilannekuva, stabiilimpi tuotanto ja selkeämmät päivittäiset tavoitteet työntekijöille (Frandsen et al. 2013; Frandsen & Tommelein 2014; Dlouhy et al. 2016; Haghsheno et al. 2016; Binninger et al. 2018; Østnor et al. 2018). Fiallo ja Howell (2012) sekä Vatne ja Drevland (2016) olivat taas havainneet tahtituotannon vaikuttaneen positiivisesti työntekijöiden työsaavutuksiin.

Lopuksi käsiteltiin tämän diplomityön tavoitteen kannalta oleellisinta teemaa, eli hukkaa tahtituotannossa. Huomattiin, että hukkaa tahtituotannossa käsittelevää kirjallisuutta on tehty niukasti, joten päätelmiä tahtituotannon suhteesta hukkaan tehtiin vertailemalla sen ominaisuuksia ja sillä saavutettuja hyötyjä muissa kirjallisuuskatsauksen teemoissa ilmenneisiin aiheisiin. Lyhentyneiden läpimenoaikojen tunnistettiin liittyvän vähentyneeseen hukkaan tuotteen virtauksessa. Tahtituotanto parantaa tuotteen virtausta poistamalla tarpeetonta WIP:iä sekä eri työvaiheiden väliltä että yksittäisten työvaiheiden sisältä. Eri työvaiheiden väliltä tarpeetonta WIP:iä poistetaan minimoimalla kiinteät aikapuskurit ja tahdistamalla työvaiheet etenemään samalla vauhdilla mestalta toiselle. Yksittäisten työvaiheiden sisältä WIP:iä poistetaan käyttämällä tuotannossa pienempää eräkokoa. Työn virtauksessa sijaitsevaan hukkaan tahtituotannossa huomattiin olevan vaikeampaa päästä käsiksi. Howell et al. (2001) ovat esittäneet kapasiteettipuskureiden käytön alentavan työntekijöiden tuottavuutta ja Seppänen (2014) on myös kritisoinut kapasiteettipuskureiden johtavan kohtuuttoman suureen varamestaa tarpeeseen, mikäli tuotannossa on paljon vaihtelua. Tahtituotannolla on kuitenkin raportoitu saavutettuja hyötyjä myös työn virtauksessa (Fiallo & Howell 2012; Vatne & Drevland 2016), joten tiheän tahtiohjauksen avulla saavutettavien tuotannon stabiiliuden, parantuneen tilannekuvan ja läpinäkyvyyden pääteltiin vähentävän vaihtelua, minkä vuoksi vähentynyt hukka myös työn virtauksessa on ollut mahdollista saavuttaa.

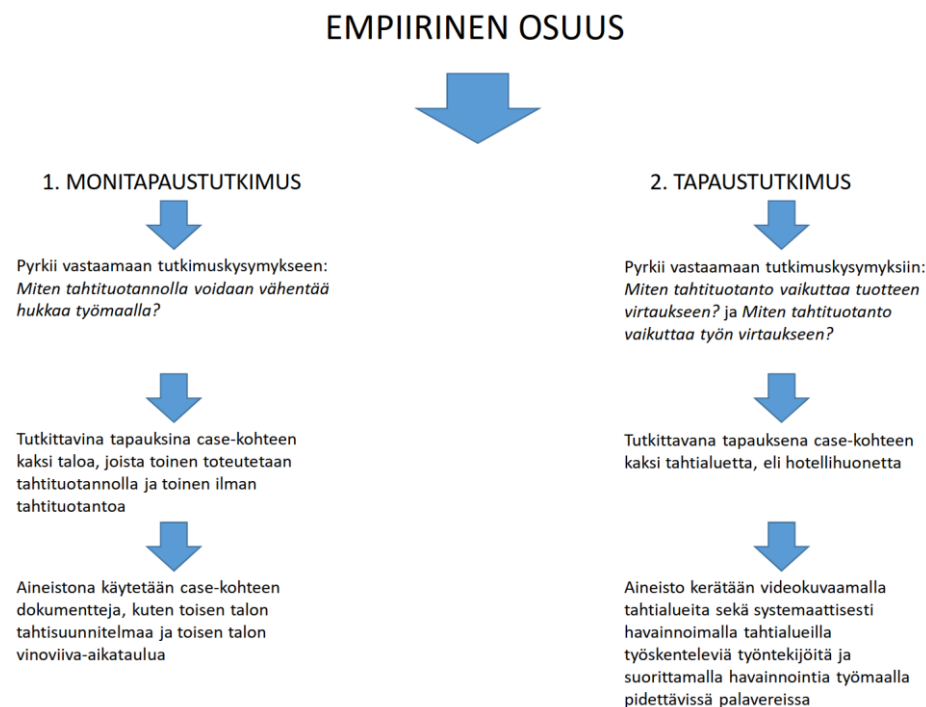
Diplomityön tavoitteen ollessa tarkastella tahtituotannon potentiaalia hukan vähentäjänä, voidaan kirjallisuuden perusteella tahtituotannon vähentävän hukkaa tuotteen virtauksessa ja mahdollisesti myös työn virtauksessa. Työn virtauksessa hukan vähentäminen on mahdollista, mikäli tahtiohjausta toteutetaan tarpeeksi tiheästi ja laadukkaasti ja mikäli työryhmille on määritetty selkeää varamestaa tarpeeksi.

7 Empiirinen tutkimus

7.1 Tutkimusmenetelmät

Empiirisen osuuden tutkimusstrategiana oli tapaustutkimus. Tapaustutkimus sopii tutkimusstrategiaksi, kun tutkimuksen on tarkoitus olla kartoittava, eli selvittää mitä tapahtuu, etsiä uusia näkökulmia tai selvittää vähän tunnettuja ilmiöitä. (Hirsjärvi et al. 2000) Kun tutkimusta suunnitellaan on mahdollisuus toteuttaa monitapaustutkimus yksittäisen tapaustutkimuksen sijaan, on se suositeltavaa valita tutkimusmenetelmäksi. Vaikka monitapaustutkimus sisältäisi vain kaksi tapausta, on se mahdollista toteuttaa kattavampana, kuin yksittäinen tapaustutkimus. (Yin 2009) Tämän työn empiirinen osuus toteutettiin kahtena erillisenä tapaustutkimuksena, jotta työ vastaisi mahdollisimman hyvin tavoitteiksi asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen pyrittiin vastaamaan monitapaustutkimuksella, jossa tapauksina oli rakennushankkeen kaksi erillistä rakennusta, joista toinen toteutettiin tahtituotannolla ja toinen ilman tahtituotantoa. Toiseen ja kolmanteen tutkimuskysymykseen pyrittiin vastaamaan tapaustutkimuksella, jonka tapauksena oli kohteen tahtituotannolla toteutettava talo. Tapaustutkimukselle on tyypillistä, että aineistoa kerätään monia eri menetelmiä käyttämällä, kuten havainnoimalla, haastatteluilla ja tutkimalla dokumentteja. (Hirsjärvi et al. 2000.) Tämän diplomityön tapaustutkimuksissa käytettiin erilaisia aineiston keruumenetelmiä. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen aineistona käytettiin projektin dokumentteja, toisen ja kolmannen tutkimuskysymyksen aineisto kerättiin nauhoittamalla videokuvaa tahtituotantoa noudattavalta työmaalta kahdesta eri tahtialueesta. Samanaikaisesti videonauhoituksen aikana kerättiin dataa havainnoimalla kahden tahtialueen työtä ja siellä työskennelleitä työntekijöitä. Datan keruun toteuttamisesta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 7.3 Datan keruun toteuttaminen. Kuvassa 8 on kuvattu diplomityön empiirisen osuuden rakenne, jolla pyrittiin vastaamaan diplomityön tavoitteiksi asetettuihin tutkimuskysymyksiin.



Kuva 8 Empiirisen osuuden rakenne

7.2 Tutkittavat aiheet ja hypoteesit

Diplomityön tavoitteena oli selvittää tahtituotannon potentiaali hukan vähentämisessä työmaalla vastaamalla kolmeen ennalta määritellyyn tutkimuskysymykseen. Työssä lähestyttiin tutkittavia aiheita tutkimuskysymysten kautta yksitellen ja muodostettiin hypoteesit jokaiselle tutkimuskysymykselle erikseen perustuen kirjallisuussosiassa hankittuun tietoon.

Ensimmäinen tutkimuskysymys: *Miten tahtituotannolla voidaan vähentää hukkaa työmaalla?* paneutuu teoreettisiin keinoihin vähentää hukkaa työmaalla tahtituotannon avulla. Yhteyksiä tahtituotannon ja hukan vähentämisen välillä on tutkittu kirjallisuuskatsauksessa. Empiirisessä osuudessa haettiin kirjallisuuskatsauksen löydöksille vahvistusta case-kohteeseen tehdyllä monitapaustutkimuksella, jossa verrattiin kahden eri talon, tahtituotannolla toteutetun ja perinteisesti toteutetun, aikatauluja keskenään. Aikatauluista pyrittiin tunnistamaan hukkaa ja vertailemaan kahden eri tapauksen aikataulujen hukkaa keskenään. Kuten on jo todettu, tahtituotannossa priorisoidaan minimoitavaksi hukka, joka ilmenee muodossa: työ odottaa työntekijää (Faloughi et al. 2015). Sacks (2016) on esittänyt, kuinka tyhjän tilan muodossa oleva hukka on helppo tunnistaa vinoviiva-aikataulusta. Näistä syistä johtuen ensimmäisessä monitapaustutkimuksessa vertailtiin tahtisuunnitelmaa saman hankkeen vastaavan talon vinoviiva-aikatauluun ja verrattiin aikatauluissa esiintyvää tyhjän tilan muodossa olevaa hukkaa.

Tutkimuksessa asetettuihin ongelmiin on mahdollista ennakoida ratkaisuja tai selityksiä ”sivistyneiden arvausten”, eli hypoteesien avulla. Tieteellisessä tutkimuksessa edellytetään, että hypoteesit ovat perusteltuja. Yleisimmin perustelut hankitaan teoriasta, teoreettisista malleista tai aiemmin tehdyistä tutkimuksista. (Hirsjärvi et al. 2000.) On todettu, että tahtituotanto priorisoi hukan, joka ilmenee tyhjillään olevan tilan muodossa, minimointia, joten oletuksena on, että tahtisuunnitelmassa esiintyisi vähemmän tätä hukan muotoa, kuin toisen talon vinoviiva-aikataulussa. Vinoviiva-aikatauluttamisen, eli LBMS-menetelmän, ja tahtisuunnittelun suurimmaksi eroksi on tunnistettu eri puskureiden priorisointi (Frandsen et al. 2015). Hypoteesina kirjallisuuden perusteella pidettiin sitä, että tahtituotannossa olisi vähemmän tyhjän tilan muodossa olevaa hukkaa, johtuen tuotannon puskuroinnista kapasiteettipuskureilla, kiinteiden aikapuskureiden sijaan. Vertailemalla aikatauluja teoreettisella tasolla, eli tässä tapauksessa projektin dokumentaatiota hyödyntäen, ei kuitenkaan oletettu pääsevän käsiksi työn virtauksessa sijaitsevaan hukkaan, vaan teoreettiseen hukkaan tuotteen virtauksessa.

Toisen tutkimuskysymyksen: *Miten tahtituotanto vaikuttaa tuotteen virtaukseen?* tutkittavana aiheena oli tahtialueiden toteutunut käyttöaste toisen tapaustutkimuksen tapauksen tahtialueilla. Mestän käyttöastetta mittaamalla pyrittiin pääsemään käsiksi hukan muotoon, jossa työ odottaa työntekijää, eli tuotteen virtauksessa sijaitsevaan hukkaan. Tilojen käyttöastetta mittaavia tutkimuksia on tehty niukasti, mutta kirjallisuuskatsauksessa löydettiin kolme käyttöastetta mitannutta tutkimusta, näissä tutkimuksissa mestän käyttöasteeksi saatiin 10 – 38,5 % mitatulla ajanjaksolla. (Ward & McElwee 2007; Tetik et al. 2018; Salerto 2019). Käyttöasteen laskentatavasta riippuen näistä keskenään vertailukelpoisia ovat Ward ja McElwee (2007) sekä Salerto (2019) tekemät tutkimukset. Ward & McElwee (2007) saivat tuloksena perinteistä tuotantomallia noudattavalta työmaalta 10 % mestän käyttöasteen, kun taas Salerto sai tulokseksi tahtituotantoa noudattavalta työmaalta 24 % käyttöasteen. Tahtituotannon priorisoidessa tuotteen virtauksessa olevan hukan minimoimista, voidaan käyttöasteen olettaa olevan Ward ja McElwee (2007) tulosta, eli 10 % käyttöaste, korkeampi. Salerto (2019) kuitenkin pitää tuloksena saamaansa käyttöastetta

matalana ja pohtiikin priorisoinnin olleen tahtituotannosta huolimatta työn virtauksessa. Tahtituotannon on todettu toimivan sitä tehokkaammin, mitä lyhyempi tahtiaika ja pienempi tahtialue sillä on (Haghsheno et al. 2016). Hypoteesiksi muodostuikin siis oletus, että käyttöaste olisi samaa tasoa Salerto (2019) kanssa tai korkeampi, riippuen tahtituotannossa käytetystä eräkoosta.

Toisen tutkimuskysymyksen yhteydessä pohdittiin myös syitä mahdolliselle poikkeamille tuotteen virtauksessa. Tähän pyrittiin vastaamaan tutkimalla syitä, miksi työntekijä ei päässyt mestalle tekemään arvoa tuottavaa työtä ja mesta oli tyhjillään ja odotti työntekijää. Salerto (2019) osoitti diplomityössään, että tahtialueen käyttöaste poikkesi huomattavasti suunnitellusta. On kiinnostavaa pyrkiä pääsemään käsiksi syihin, mistä nämä mahdolliset poikkeamat johtuivat. Tähän pyrittiin vastaamaan havainnoimalla työntekijöitä ja havainnoimalla työmaan palaverissa. Alkuhypoteesina oli siis, että kuten Salerron (2019) diplomityössä, toteutunut käyttöaste ei vastaa ainakaan täydellisesti suunniteltua.

Kolmanteen tutkimuskysymykseen: *Miten tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen?* pyrittiin vastaamaan hyödyntämällä samaa tapaustutkimusta toisen tutkimuskysymyksen kanssa. Selvittämällä tahtituotannon vaikutukset sekä hukkaan tuotteen virtauksessa että hukkaan työn virtauksessa, pyrittiin muodostamaan kokonaiskuva tahtituotannon potentiaalista rakennustuotannossa ilmenevän hukan vähentäjänä. Kirjallisuuden perusteella kapasiteettipuskureilla puskuroidussa tuotannossa pitäisi ilmetä enemmän hukkaa työn virtauksessa (Howell et al. 2001), mutta tahtituotannolla ollaan kuitenkin saavutettu parantuneita työn virtauksia (Fiallo & Howell 2012; Vatne & Drevland 2016). Seppänen (2014) mukaan vaihtelua sisältävä, kapasiteettipuskureilla puskuroitu, tuotanto vaatii tarpeeksi paljon selkeää varamestaa jokaiselle työvaiheelle, saavuttaakseen hyvän työn virtauksen. Tiheään tapahtuvan tahtiohjauksen on esitetty tekevän tuotannosta stabiilimpaa (Haghsheno et al. 2016) ja tahtituotannon onkin raportoitu tekevän tuotannosta läpinäkyvämpää ja parantaneen tilannekuvaa (mm. Frandson & Tommelein 2014; Binniger et al. 2018). Tämän pohjalta kirjallisuuskatsauksessa tehtiin tulkinnallinen päätelmä tiheään tapahtuvan tahtiohjauksen roolista tuotannossa esiintyvän vaihtelun vähentäjänä, millä voitaisiin selittää tahtituotannolla saavutetut parantuneet työn virtaukset. Kirjallisuuden pohjalta muodostettuna hypoteesina pidettiin sitä, että tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen parantavasti poistamalla siitä hukkaa. Ehtona tälle kuitenkin on, että työvaiheille on määritetty tarpeeksi paljon selkeää varamestaa ja tahtiohjausta toteutetaan tarpeeksi tiheästi ja laadukkaasti.

7.3 Datan keruun toteuttaminen

Eri tutkimustyyppit eroavat toisistaan tarkastelukohteiden perusteella, mutta niillä on myös yhteisiä piirteitä. Mainittavimpana yhteisenä piirteenä on se, että eri tutkimustyypeissä käytetään samoja aineistonkeruumenetelmiä, eli niin kutsuttuja aineistonkeruun perusmenetelmiä. Näitä perusmenetelmiä ovat kysely, haastattelu, havainnointi ja dokumenttien käyttö. (Hirsjärvi et al. 2000.) On kuitenkin esitetty, että kyselyt ja haastattelut eivät ole luotettavia aineistonkeruumenetelmiä rakennustyömaan hukkaa mittaavissa tutkimuksissa, koska tutkimukseen osallistuvat eivät aina osaa tunnistaa mikä on arvoa tuottavaa ja mikä arvoa tuottamatonta työtä (Zhao et al. 2019). Tästä johtuen tämän diplomityön datan keruuseen ei käytettykään kyselyitä tai haastatteluita, vaan aineiston kerääminen toteutettiin havainnoinnilla ja analysoimalla case-kohteen dokumentteja sekä työmaalla kuvattua videomateriaalia.

Kyselyiden ja haastatteluiden avulla saadaan tietoa siitä, mitä henkilöt ajattelevat, tuntevat ja uskovat, mutta ne eivät kerro, mitä todella tapahtuu. Havainnoinnin avulla voidaan saada

suoraa, välitöntä tietoa yksilöiden, ryhmien tai organisaatioiden toiminnasta ja käyttäytymisestä. Havainnoinnin menetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan: systemaattiseen havainnointiin ja osallistuvaan havainnointiin. Osallistuvassa havainnoinnissa havainnoija osallistuu ryhmän toimintaan yhtenä ryhmän jäsenenä, kun taas systemaattisessa havainnoinnissa havainnoija on ryhmän ulkopuolinen toimija. (Hirsjärvi et al. 2000.) Suora, eli systemaattinen havainnointi voi sisältää havainnointia esimerkiksi palaverissa tai tarkkailua ”kentällä” (Yin 2009). Systemaattisessa havainnoinnissa havainnot pyritään tekemään ja tallentamaan systemaattisesti ja tarkasti. Tätä varten on kehitetty erilaisia apukeinoja, joista yksi tunnetuimmista on ”tsekkauslistat”, jotka tehdään ennen havainnoinnin suorittamista. ”Tsekkauslistoissa” on vain lueteltu toiminnat ja havainnoijan tehtävänä on merkitä, esiintyykö listassa mainittu asia mittausjaksolla vai ei ja mahdollisesti, että kuinka monta kertaa piirre esiintyy. (Hirsjärvi et al. 2000.)

Dokumentaation hyödyntäminen on relevanttia lähes jokaisessa tapaustutkimuksessa ja sen vahvuutena on, että aineisto on stabiilia, joten samoja dokumentteja voidaan tulkita uudelleen, eikä niitä ei ole tehty vain tutkimusta varten, jolloin sisältö on mahdollisimman vääristymätöntä (Yin 2009). Rakennustyömaalla mestan käyttöastetta mitanneissa monitapaustutkimuksissa on käytetty hyödyksi videokuvausta (Tetik et al. 2018). Tetik et al. (2018) mittasivat mestan käyttöastetta liiketunnistimilla toimivilla videokameroilla työn alla olevissa asunnoissa. Myös Trucco ja Kaka (2004) mainitsevat mallin, jossa kameraa hyödynnetään työmaan edistymisen seurannassa. Tetik et al. (2018) osoittavat videokuvaan perustuvan mittauksen olevan toimiva datan keräyksen metodi ja esittääkin sen uutena datan keruun metodina vastaaville tapaustutkimuksille.

Ensimmäisen tapaustutkimuksen aineistona käytettiin case-kohteen dokumentaatiota, tarkemmin ottaen projektilta löytyneitä aikataulutiedostoja. Talon A1, joka toteutettiin ilman tahtituotantoa, vinoviiva-aikataulua verrattiin talon A2 tahtiaikatauluun. Vinoviiva-aikataulusta tarkasteltiin vain työvaiheita, jotka sisältyvät tahtiaikatauluun, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Vinoviiva-aikataulusta analysoitiin aika- ja tilapuskureiden muodossa olevaa hukan määrää Sacks (2016) osoittamalla tavalla. Tahtisuunnitelmasta laskettiin suunniteltu mestan käyttöaste työkuormalaskennan pohjalta. Analysoinnin tavoitteena oli osoittaa kummastakin aikataulusta vertailukelpoiset tyhjänä mestana ilmenevän hukan määrät. Aikatauluista analysoitiin myös WIP, eli keskeneräisten huoneiden määrä aloittaen tahtiaikataulun ensimmäisen työvaiheen alusta ja päättyen tahtiaikataulun viimeisen työvaiheen loppuun. Näillä arvoilla pyrittiin muodostamaan vertailu, jolla pystytäisiin yhdessä kirjallisuuskatsauksessa saadun tiedon avulla vastaamaan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen.

Toisen tapaustutkimuksen tutkimuskysymyksiin vastaamiseen dataa kerättiin videokuvaamalla ja havainnoimalla. Case-kohteen kahteen hotellihuoneeseen asennettiin liiketunnistimella toimivat videokamerat kahden viikon ajaksi. Kameroina käytettiin Arlo Go -kameroita, jotka asennettiin huoneisiin kuvan 9 mukaisesti. Videokuvasta analysoitiin mestojen todellinen käyttöaste ja sitä verrattiin mittausjaksolle suunniteltuun käyttöasteeseen sekä jakson kokonaistyöskentelyaikaan. Videosta analysoitiin myös päivittäin kunkin urakoitsijan käynnit hotellihuoneessa, käyntien pituus ja tehty työ, mikäli se oli selkeästi havaittavissa. Tällä analyysillä oli tarkoitus päästä käsiksi tahtituotannon vaikutuksesta työn virtaukseen yhtäjaksoisten käyntien pituuden ja käyntien lukumäärän kautta. Datat keräys toteutettiin samanaikaisesti kahdessa vierekkäisessä huoneessa, jotka olivat pohjaratkaisultaan

mahdollisimman samanlaiset, jotta myös eri huoneiden välisiä tuloksia oli helppo vertailla keskenään.



Kuva 9 Arlo Go -kamera asennettuna hotellihuoneen oviaukkoon

Toisen tapaustutkimuksen tutkimuskysymyksiin vastaamista varten dataa kerättiin myös suorittamalla työmaalla systemaattista havainnointia videomittausjakson aikana. Systemaattisen havainnoin kohteena olivat toiseen tapaustutkimukseen valitun tapauksen kaksi tah-tialuetta, joissa videomittausa suoritettiin ja niissä tahtisuunnitelman mukaan työskennelleet työntekijät. Havainnointikierroksella diplomityöntekijä teki pistokoemaisesti käyntejä työ-maalle, joissa tarkastettiin, työskenneltiinkö huoneessa ja mikäli huoneessa ei työskennelty, pyrittiin selvittämään missä työntekijä oli ja miksi hän ei voinut olla työskentelemässä mes-talla. Tätä systemaattista havainnointia varten oli etukäteen laadittu ”tsekkauslista”, jotta ha-vainnointi olisi järjestelmällisempää ja yksinkertaisempaa. ”Tsekkauslista” on tämän työn ensimmäisenä liitteenä (Liite 1) ja se on kasattu pohjautuen Koskelan (2000) määrittämiin seitsemään aloitusedellytyksen virtaukseen. Tällä pyrittiin selvittämään syitä sille, miksi tuote tai työ ei päässyt virtaamaan tuotannossa, eli työntekijä ei päässyt lisäämään kyseisen mestan arvoa silloin kun se oli suunniteltu tehtäväksi. Pistokoemaisesti toteutetun havain-noinnin tueksi dataa kerättiin myös havainnoimalla aamuittain pidettävissä tahtituotannon päivittäisjohtamisenpalavereissa, urakoitsijapalavereissa, mestaripalavereissa ja mahdoli-sissa muissa mittausjaksolle osuvissa palavereissa. Havainnointi toteutettiin käyttämällä etu-käteen laadittua havainnointilomaketta, joka on tämän diplomityön toisena liitteenä (Liite 2). Havainnoimalla palavereissa pyrittiin saamaan lisää johtolankoja kohti syitä, mistä poik-keamat toteutuneen aikataulun ja tahtisuunnitelman välillä johtuvat sekä tuotteen että työn virtauksen osalta.

7.4 Case: Vallila Folks Hotel

Tutkimuksen Case-työmaana toimi NCC Suomi Oy:n Korjausurakointi-yksikön työmaa Vallila Folks Hotel. Kohde koostui kolmesta eri aikakausina toimitilakäyttöön rakennetuista taloista, joihin tehtiin peruskorjaus sekä käyttötarkoituksen muutos hotellikäyttöön. Hankkeen urakkamuotona oli KVR-urakka, jossa pääurakoitsija oli sekä suunnittelu- että rakentamisvastuussa. Kohteen käyttäjällä, eli hotellioperaattorilla oli kuitenkin vastuullaan kohteen konsepti-, eli sisustussuunnittelu, joka ohjaa lähtötiedoillaan pääurakoitsijan teettämää suunnittelua. Valmiiseen rakennukseen tuli 147 hotellihuonetta sekä vastaanotto-, ravintola- ja muita yleisiä tiloja. Rakennuksista uusimman, 1980-luvulla valmistuneen, 75 hotellihuonetta sisältävän talon hotellihuoneiden sisävalmistustyöt toteutettiin tahtituotannolla. Kohde toimi samalla myös yrityksen tahtituotannon pilottihankkeena.

Kohteen ollessa pilottihanke, tahtisuunnittelua hankittiin konsultoimaan Vison Oy. Alkuperäisen tahtisuunnitelman mukaan kaikki kolme taloa oltaisiin toteutettu tahtituotannolla, mutta tahtisuunnittelun edetessä pääurakoitsija päätti rajoittaa tahtipilotoinnin yhteen taloon. Tahtisuunnittelu eteni ensin tunnistamalla työvaiheitaan ja työmääriltään toistuviksi alueiksi hotellihuone sekä hotellihuoneen kylpyhuone, jonka jälkeen tahtiajaksi määriteltiin yksi päivä ja tahtialueeksi valittiin toiselle tuotantojunalle yksi hotellihuoneen kylpyhuone ja toiselle tuotantojunalle yksi hotellihuone. Toisin kuin esimerkiksi Tommelein (2017) kuvaamassa tahtisuunnittelun prosessissa, jossa tahtiaika määritellään kestoltaan pisimmän työvaiheen, jota ei ole mahdollista jakaa osiin, mukaan, tämän kohteen tahtiaika määriteltiin päivän mittaiseksi perustuen kohteen luovutuspäivämäärään ja hotellihuoneiden määrään, kuten esimerkiksi Heinosen ja Seppäsen (2016) kuvailemassa hyttiremonttien tahtisuunnittelussa. Tämä tahtiajan määrittely tehtiin jo siinä vaiheessa, kun tarkoituksena oli toteuttaa koko kohde tahtituotannolla, eikä sitä muutettu sen jälkeen, kun tahtituotanto päätettiin rajata yhteen taloon. Tahtisuunnittelu eteni listaamalla suoritettavat työvaiheet kummallekin junalle, eli hotellihuoneen kylpyhuoneen ja hotellihuoneen tuotantojunille pääurakoitsijan työmaatoimihenkilöiden kesken. Näille työvaiheille määritettiin kestot perustuen Ratu-mennekkeihin ja pääurakoitsijan työmaatoimihenkilöiden muodostamiin arvioihin.

Kohteessa rakentamisen kanssa rinnan toteutettu suunnittelu rajoitti hankintojen tekemistä etukäteen ja sen vuoksi myös aliurakoitsijoiden mukaan ottaminen tahtisuunnitteluun aikaisessa vaiheessa ei ollut mahdollista. Kohteen suunnitelmat eivät olleet tahtisuunnitelmaa tehdessä sillä tasolla, että urakoitsijat oltaisiin voitu ottaa heti mukaan tahtisuunnitteluun, koska suunnitelmat olivat liian puutteelliset hankintojen tekemiseen. Aliurakoitsijoita otettiin siis sitä mukaan osaksi tahtituotannon suunnittelua, kun hankintoja saatiin tehtyä. Tämä aiheutti haasteita, koska joidenkin aliurakoitsijoiden kanssa sitouttaminen ja perehdyttäminen tahtituotantoon jäi ajanpuutteen vuoksi hyvin vähäiseksi ja osaa tahtituotantoon kuuluvista aliurakoitsijoista ei oltu hankittu vielä tahtituotannon aloitusajankohtanakaan. Tahtituotannon implementoinnissa koettiin myös haasteita, johtuen suunnitelmapuutteista, myöhästyneistä hankinnoista ja tahtia edeltävien työvaiheiden myöhästymisestä. Näistä syistä johtuen tahtituotannon aloitusta jouduttiin siirtämään useaan kertaan ja yhteensä noin kolme kuukautta alkuperäisestä aloitusajankohdasta.

Lopullinen tahtisuunnitelma muodostettiin yhdessä aliurakoitsijoiden kanssa heidän arvioimillaan työsuoritteiden kestoilla luodusta työkuormalaskennasta. Työkuormalaskenta on esitetty kuvassa 10. Työkuormalaskennassa ”Kesto” ja ”Tahtiaika” on esitetty tunteina ja ”Kuorma” on laskettu jakamalla kesto tahtiajalla. Kestolla tarkoitetaan työvaiheen suoritta-

miseen tarvittavaa aikaa työntekijää kohden. Kestojen perusteella eri työvaiheista muodostettiin työpaketteja, eli vaunuja. Vaunut määriteltiin yhdistelemällä peräkkäisiä työvaiheita niin, että ne ehditään suorittaa yhden tahtiajan puitteissa. Vaunujen määrittämisessä otettiin huomioon myös työkuormalaskentaan määritetyt kuivumisajat eri työvaiheiden välissä. Vaunujen määrittelyssä rajoitteena toimi myös se, että ne määriteltiin aliurakoitsijoittain, eli yhdessä vaunussa ei ollut kuin yhden aliurakoitsijan töitä. Toisaalta hotellihuoneen puolelle saattoi olla suunniteltu saman aikaisesti toteutettavaksi eri aliurakoitsijan työpaketti kuin saman hotellihuoneen kylpyhuoneeseen. Tahtisuunnitelman prioriteettina oli saada aliurakoitsijan resursseille työtä jokaiselle työpäivälle riittävästi. Tämä varmistettiin laskemalla resursseille aiheutuvat työkuormat päiväkohtaisesti.

Hotellihuoneet	Suoritteet	Urakoitsija	Vaunu	Hlö määrä	Kesto	Tahtiaika	Kuorma
	1 Ääneneristysalakatot + otsa(pl. Levyt)	Alakatto	H1		1	5,00	7,5 67 %
	2 Sähkövedot alakaton yläpuolelle (paloilm.) + keskuksen kotelot	Sähkö	H2		1	1,00	7,5 13 %
	3 Tarkastus						
	4 Eteisen laatoituksen pohjatyöt	Laatta	H3		1	2,00	7,5 27 %
	5 Eteisen laatoitus	Laatta	H4		1	4,00	7,5 53 %
	6 Eteisen laatoituksen saumaus	Laatta	H5		1	1,50	7,5 20 %
	7 Alakatto levytys	Alakatto	H6		1	4,50	7,5 60 %
	8 Nauhoitus katto ja seinät	Maalari/tasoittaja	H7		1	4,00	7,5 53 %
	9 Nauhoitettujen pintojen kuivuminen						
	10 Nauhoitettujen saumojen tuplaus (tasoitus toiseen kertaan)	Maalari/tasoittaja	H8		1	2,00	7,5 27 %
	11 Tasoite kerran kuivuminen						
	12 Hionta	Maalari/tasoittaja	H9		1	2,00	7,5 27 %
	13 Pohjamaalaus	Maalari/tasoittaja	H9		1	3,00	7,5 40 %
	14 Pohjamaalauksen kuivuminen						
	15 Tasoiteoitelu (ts.kittikerros)	Maalari/tasoittaja	H10		1	2,00	7,5 27 %
	16 Sisäkulmien ja katonrajojen akrylointi	Maalari/tasoittaja	H10		1	2,00	7,5 27 %
	17 Kittikerroksen ja akryloinnin kuivuminen						
	18 Kittipaikkojen hionta	Maalari/tasoittaja	H11		1	1,00	7,5 13 %
	19 Välimaalaukset	Maalari/tasoittaja	H11		1	2,00	7,5 27 %
	20 Välimaalauksen kuivuminen						
	21 Pintamaalaus 1. krt	Maalari/tasoittaja	H12		1	4,00	7,5 53 %
	22 Pintamaalaus 2. krt	Maalari/tasoittaja	H13		1	4,00	7,5 53 %
	23 Pintamaalauksen kuivuminen						
	24 Pattereiden asennus	Putki	H14		1	2,00	7,5 27 %
	25 Matto pohjat	Sisustus	H15		1	1,50	7,5 20 %
	26 Mattotyöt	Sisustus	H16		1	3,00	7,5 40 %
	27 Sähkökalusteet	Sähkö	H17		1	6,00	7,5 80 %
	28 Kalusteet	Kaluste	H18		2	5,50	7,5 73 %
	29 Oviasennus	Sisustus	H19		1	1,00	7,5 13 %
	30 Listat	Sisustus	H19		1	4,00	7,5 53 %
	31 Varusteet	Sisustus	H19		1	1,00	7,5 13 %
	32 Tarkastus						
	33 Viimeistely	RAK	H20		1	2,00	7,5 27 %
	34 Loppusiivous	Siivous	H21		2	1,50	7,5 20 %
	35 IV-venttiileiden kiinnitys ja pölysuojauksien poisto	IV	H22		1	0,5	7,5 7 %
	YHTEENSÄ HUONEEN PUOLEN TYÖT				31		

KPH	Suoritteet	Urakoitsija	Vaunu	Hlö määrä	Kesto	Tahtiaika	Kuorma
	1 Seinien PEX-putkitukset ja katon viemärihajoitukset (3.krs alaspäin)	Putki	K1		1	7,5	7,5 100 %
	2 Lattian putket ja kaivot	Putkari	K2		1	3	7,5 40 %
	3 Lattian kaivojen valut	RAK	K3		1	2	7,5 27 %
	4 Sähkövedot alakatto + jakorasioiden asennus ja kytkentä	Sähkö	K4		1	2	7,5 27 %
	5 Lattialämmitys	Sähkö	K4		1	2	7,5 27 %
	6 Tarkastus						
	7 Kaatolattia	Laatta	K5		2	2,5	7,5 33 %
	8 Kaatolattia kuivuminen					16	
	9 Tarkastus						
	10 Väliseinät tuplaus	VS	K6		1	3	7,5 40 %
	11 VE 1. kerros	laatta	K7		1	4	7,5 53 %
	12 VE 1. kerros kuivumisaika						
	13 VE 2. kerros	laatta	K8		1	1	7,5 13 %
	14 VE 2. kerros kuivumisaika						
	15 Rosterikynnys	Laatta	K8		1	0,5	7,5 7 %
	16 Rosterikynnys kuivuminen						
	17 Laatoitus lattia	Laatta	K9		1	4	7,5 53 %
	18 Laatoitus lattia kuivuminen	Laatta					
	19 Laatoitus seinä	Laatta	K10		1	7	7,5 93 %
	20 Laatoitus seinä kuivuminen	Laatta					
	21 Saumaus	Laatta	K11		1	4	7,5 53 %
	22 Saumaus kuivuminen	Laatta	K12				
	23 Silikonit	Laatta	K13		1	1	7,5 13 %
	24 Silikonit kuivuminen	Laatta					
	25 Alakatto rungot + levytys	Alakatto	K14		1	4	7,5 53 %
	26 Seinien suojaus + Alakaton nauhoitus (1. tasoituskerta)	Maalari/tasoittaja	K15		1	1	7,5 13 %
	27 Nauhoitettujen pintojen kuivuminen						
	28 2. tasoituskerta	Maalari/tasoittaja	K16		1	1	7,5 13 %
	29 Tasoitteen kuivuminen						
	30 Alakaton pohjamaalaus	Maalari/tasoittaja	K17		1	1	7,5 13 %
	31 Alakaton pohjamaalaus kuivuminen						
	32 Alakaton akrylointi + hionta	Maalari/tasoittaja	K17		1	2	7,5 27 %
	33 Akryyliin kuivuminen						
	34 Alakaton pintamaalaus	Maalari/tasoittaja	K18		1	1	7,5 13 %
	35 Alakaton pintamaalaus kuivuminen					4	7,5 53 %
	36 Vesikalusteet (suihku ja pöntön liimaus + hanakulmarasia)	Putkari	K19		1	6	7,5 80 %
	37 sähkökalusteet	Sähkö	K20		1	1	7,5 13 %
	38 Kalusteet	Kaluste	K21		1	2	7,5 27 %
	39 Oviasennus	Sisustus	K22		1	1	7,5 13 %
	40 Varusteet	Sisustus	K22		1	1	7,5 13 %
	41 Tarkastus						
	42 Viimeistely	RAK	K23		1	2	7,5 27 %
	43 Loppusiivous		K24		1	0,5	7,5 7 %
	44 IV-venttiileiden kiinnitys ja pölysuojauksien poisto	IV	K25		1	0,5	7,5 7 %
	YHTEENSÄ KPH PUOLEN TYÖT				27		

Kuva 10 Työkuormalaskenta työvaiheittain sekä hotellihuoneille että hotellihuoneiden kylpyhuoneille

Kuvassa 11 on esitetty Case-työmaan työpaketit aliurakoitsijoittain suoritusjärjestyksessä, eli niin kutsutut vaunuista, eli työpaketeista, koostuvat tuotantojunat sekä hotellihuoneelle että hotellihuoneen kylpyhuoneelle. Kuvassa 12 on esitetty otos hotellihuoneen tuotantojunan aikataulusta viiden ensimmäisen huoneen osalta ja kuvassa 13 on esitetty otos viiden ensimmäisen hotellihuoneen kylpyhuoneen osalta. Kuvassa 14 on esitetty resursointisuunnitelma, jossa on päivittäiset työpaketit ja niistä aiheutuvat työkuormat resursseittain. Resursointisuunnitelman ”Kuorma” on laskettu työkuormalaskennasta saadusta vaunukohtaisesta kuormasta ja ”KA” tarkoittaa aliurakoitsijakohtaista, resursseille aiheutuvan työkuorman keskiarvoa. Tämä resursointisuunnitelma toimitettiin aliurakoitsijoille, jolloin he pystyivät käyttämään sitä työmaalle sijoitettavien resurssien suunnittelun tukena. Työkuormalaskentaa ja resursointisuunnitelmaa oli tarkoitus tarkentaa työvaiheiden kestojen osalta tahtituo- tannon käynnistyttyä. Aliurakoitsijoille ei määritetty tahtialueiden lisäksi erillisiä varames- toja. Osalla aliurakoitsijoista oli kuitenkin tiedossaan tahtialueiden lisäksi alueita, joissa he voivat työskennellä tahdin ohessa, mutta näitä alueita ei määritelty erikseen mihinkään suun- nitelmaan.

Hotellihuone		Työpaketti	Urakoitsija
H1	H1 Ääneneris	Ääneneristysalakatot + Otsa(pl. Levyt)	Alakatto
H2	H2 Sähkövedot	Sähkövedot alakatto (paloilm.) ja keskuksen kotelo	Sähkö
H3	H3 Eteinen laat.poh.	Eteisen laatoituksen pohjatyöt	Laatta
H4	H4 Laatat lattia	Eteisen laatoitus	Laatta
H5	H5 Laatat lattia	Eteisen laatoituksen saumaus	Laatta
H6	H6 Alakatto	Alakatto levytys	Alakatto
H7	H7 Nauhoitus	Nauhoitus katto ja seinät + kuivuminen	Maalari
H8	H8 Nauha tuplaus	Nauhoitettujen saumojen tuplaus (tasoitus toiseen kertaan) + kuivuminen	Maalari
H9	H9 Hionta + pohjam.	Hionta + Pohjamaalaus + kuivuminen	Maalari
H10	H10 Tasoit. Osit. + Akryl.	Tasoiteosittelu (ts. kittikerros) + sisäkulmien ja katonrajojen akrylointi + kuivuminen	Maalari
H11	H11 Hionta + välimaal.	Kittipaikkojen hionta + välimaalauus + kuivuminen	Maalari
H12	H12 Pintamaal.	Pintamaalaus 1. krt. + kuivuminen	Maalari
H13	H13 Pintamaal.	Pintamaalaus 2. krt + kuivuminen	Maalari
H14	H14 Patterit	Pattereiden asennus	Putki
H15	H15 Matto pohjat	Matto pohjat	Sisustus
H16	H16 M. asennus	Mattotyöt	Sisustus
H17	H17 Sähkökalut	Sähkökalusteet, ATK kytkentä	Sähkö
H18	H18 Kalusteet	Kalusteet	Kaluste
H19	H19 Ovi + lista + varus.	Oviasennus+ Listoitus + Varusteet	Sisustus
H20	H20 Viimeistely	Viimeistely	RAK
H21	H21 Siivous	Loppusiivous	Siivous
H22	H22 venttiilit	IV-venttiileiden kiinnitys ja pölysuojauksien poisto	IV

Kylpyhuone		Työpaketti	Urakoitsija
K1	K1 PEX+viemäri	Seinien PEX-putkitukset ja katon viemärihajoitukset (3.krs eteenpäin)	Putki
K2	K2 putki+kaivo	Lattian putket ja kaivot	Putki
K3	K3 Palok.+valu	Lattian kaivojen valut (HUOM. Palotiivistys alapuolelta)	RAK
K4	K4 alak.+rasiat+lat	Sähkövedot alakatto ja seinät + jakorasioiden asennus ja kytkentä + lattialämmitys	Sähkö
K5	K5 Kaatolattia	Kaatolattia + kuivuminen	Laatta
K6	K6 Väliseinä tuplaus	Väliseinä tuplaus	VS
K7	K7 VE 1. krs	VE 1. krs (sisältää valmistelut, nurkkavahvikkeet yms.) + kuivuminen	Laatta
K8	K8 VE 2.krs	VE 2.krs + kuivuminen ja rosterikyynnys + kuivuminen	Laatta
K9	K9 Laatat lattia	Laatoitus lattia	Laatta
K10	K10 Laatat seinä	Laatoitus seinä + kuivuminen	Laatta
K11	K11 Sauma	Saumaus	Laatta
K12	K12 kuivuu	Saumaus kuivuminen	
K13	K13 Silikonit	Silikonit + kuivuminen	Laatta
K14	K14 Alakatto	Alakatto rungot + levytys	Alakatto
K15	K15 AK Nauh.	Seinien suojaus + Alakaton nauhotus (1. tasoituskerta) + kuivuminen	Maalari
K16	K16 AK 2. tasoit.	Alakaton 2. tasoituskerta + kuivuminen	Maalari
K17	K17 AK pohjam.+akr	Hionta + alakaton Pohjamaalaus + kuivuminen + akrylointi + kuivuminen	Maalari
K18	K18 AK pintamaal.	Alakaton pintamaalaus + kuivuminen	Maalari
K19	K19 Vesikalut	Vesikalusteet 1 (suihku ja pöntön liimaus + hanakulmarasia)	Putki
K20	K20 sähkökalut	sähkökalusteet	Sähkö
K21	K21 Kalusteet	Kalusteet	Kaluste
K22	K22 Ovi + Varusteet	Oviasennus ja varusteet	Sisustus
K23	K23 Viimeistely	Viimeistely	RAK
K24	K24 Siivous	Loppusiivous	Siivous
K25	K25 venttiilit	IV-venttiileiden kiinnitys ja pölysuojauksien poisto	IV

Kuva 11 Case-työmaan tahtisuunnitelman työpaketit hotellihuoneen ja hotellihuoneen kylpyhuoneen tuotantojunille

			Viikko 39					Viikko 40				
Huone / aikataulu	Kerros	Huoneet pohjat	23.9.2019	24.9.2019	25.9.2019	26.9.2019	27.9.2019	30.9.2019	1.10.2019	2.10.2019	3.10.2019	4.10.2019
Huone 1	4	A4071	H5			H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
Huone 2	4	A4067		H5			H6	H7	H8	H9	H10	H11
Huone 3	4	A4060	H4		H5			H6		H8	H9	H10
Huone 4	4	A4055	H3	H4		H5			H6		H7	H8
Huone 5	4	A4051		H3	H4		H5			H6	H7	H8

Kuva 12 Kahden viikon otos ensimmäisten viiden hotellihuoneen aikataulusta

			Viikko 39					Viikko 40				
Huone / aikataulu	Kerros	Huoneet pohjat	23.9.2019	24.9.2019	25.9.2019	26.9.2019	27.9.2019	30.9.2019	1.10.2019	2.10.2019	3.10.2019	4.10.2019
Kylpyhuone 1	4	A4072	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18		
Kylpyhuone 2	4	A4068	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18	
Kylpyhuone 3	4	A4061	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18
Kylpyhuone 4	4	A4056	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17
Kylpyhuone 5	4	A4052	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16

Kuva 13 Kahden viikon otos ensimmäisten viiden hotellihuoneen kylpyhuoneen aikataulusta

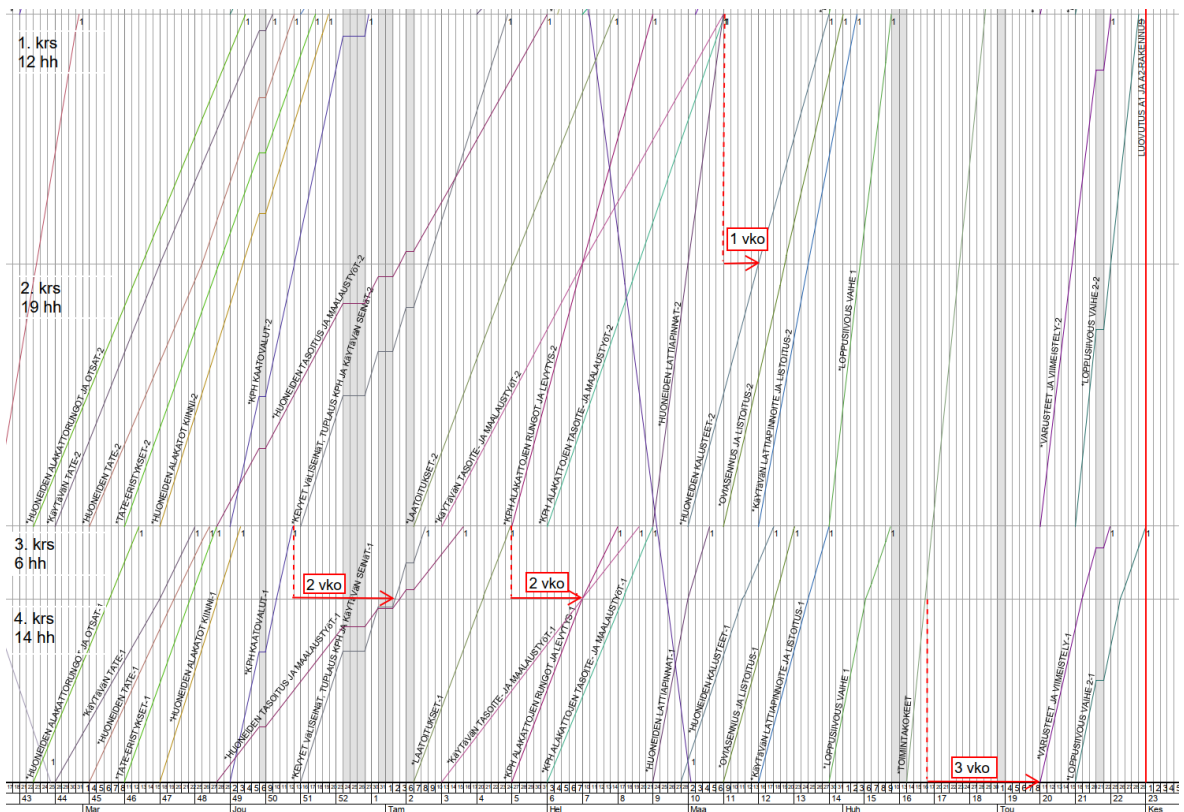
Resurssit	Vaunut		Kuorma
Väliseinät		KA:	40 %
VS1	K6		40 %
Alakatto		KA:	60 %
AK1	H1		67 %
AK2	H6		60 %
AK3	K14		53 %
Sähkö		KA:	80 %
S1	H2 K4		67 %
S2	H17 K20		93 %
Maalari/tasoite		KA:	107 %
M1	H7 H8 K15 K16		107 %
M2	H9 K17		107 %
M3	H10 H11 K18		107 %
M4	H12 H13		107 %
Sisustus			83 %
L1	H15 H16 K22		87 %
O1	H19		80 %
Kaluste		KA:	50 %
K1	H18		73 %
K2	K21		27 %
RAK			
R1	H20 K3 K23		80 %
Putkari		KA:	82 %
P1	K1		100 %
P2	K2 H14		67 %
P3	K19		80 %
IV			
IV1	H22 K25		13 %
Laatta		KA:	112 %
La1	K5 K11 H3		113 %
La2	K9 H4		107 %
La3	K7 K8 K13 H5		100 %
La4	K5 K10		127 %
Siivous			
S1	H21 K24		27 %

Kuva 14 Työpakettien jako ja niistä aiheutuvat työkuormat resursseittain

7.5 Tulokset

7.5.1 Aikataulujen vertailu

Case-kohteen toisen talon työt ja niiden suunnittelu toteutettiin perinteisin menetelmin, ilman tahtituotantoa. Tarkastelemalla kyseisen talon, eli talon A1 vinoviiva-aikataulua on aikataulusta helppoa tunnistaa jaksoja, jolloin tilat ovat suunnitelman mukaan tyhjiillään. Vinoviiva-aikataulusta tarkasteltiin työvaiheita, jotka sisältyvät myös tahtiaikatauluun, jotta aikataulut olisivat vertailukelpoisia. Kuvassa 15 on esitetty ote työmaakokouksessa ehdotetusta vinoviiva-aikataulusta, johon on tehty huomioita työvaiheiden välille jäävistä tilapuskureista, eli tyhjän mestan muodossa olevasta hukasta. Vasempaan reunaan on merkitty kerrokset sekä hotellihuoneiden (hh) määrä kerroksessa.



Kuva 15 Ote A1-talon vinoviiva-aikataulusta

Kuvassa on nostettu esille neljä kappaletta jaksoja, jolloin koko kerros on teoreettisesti tyhjiillään odottaen seuraavan työvaiheen saapumista kerrokseen. Kuvaa merkityissä jaksoissa turhaa tilan tyhjiillään oloa ilmenee ensimmäisessä kerroksessa huoneiden lattiapintojen asennuksen lopetuksen ja huoneiden kalusteiden asennuksen aloituksen välissä, koska kalusteiden asennus on aikataulun mukaan hitaampi työvaihe ja se on aikataulutettu jatkuvaksi tehtäväksi toisesta kerroksesta ensimmäiseen kerrokseen. Varsinaista aikapuskuria ei tehtävien välille ole lisätty, vaan kalusteiden asentaminen alkaa aikataulun mukaan toisessa kerroksessa välittömästi, kun lattiapinnat on siinä kerroksessa saatu tehtyä. Huoneiden kalusteiden asentamiseen on varattu ensimmäisessä kerroksessa 10 työpäivää, mikä tarkoittaa sitä, että kerroksessa viimeiseksi tehtävä huone on aikataulun mukaan 14 työpäivää tyhjiillään näiden kahden työvaiheen välillä, mikäli huoneiden kalusteiden asennus suoritetaan huone kerrallaan.

Kolmannessa kerroksessa työvaiheiden: Kylpyhuoneen kaatovalut ja kevyet väliseinät sekä laatoitukset ja kylpyhuoneen alakattojen rungot ja levytys lopetuksen ja aloituksen välille muodostuu kahden viikon tauko. Molemmissa tapauksissa tehtävät on aikataulutettu jatkuviksi neljännessä kerroksesta kolmanteen kerrokseen. Kylpyhuoneen kaatovalujen ja kevyiden väliseinien välille on neljännessä kerroksessa lopetuksen ja aloituksen väliin jätetty kolmen työpäivän aikapuskuri, mutta kevyiden väliseinien ollessa hitaampi työvaihe, kasvaa se kolmannessa kerroksessa 10 työpäivän mittaiseksi. Kevyiden väliseinien tekoon on varattu kolmannessa kerroksessa neljä työpäivää, tällöin kerroksen viimeiseksi tehtävä huone on aikataulun mukaan tyhjiällä 13 työpäivää näiden kahden työvaiheen välissä, mikäli jälkimmäinen työvaihe toteutetaan huone kerrallaan. Laatoituksen lopetuksen ja kylpyhuoneen alakattorunkojen ja levytyksen aloituksen väliin on neljännessä kerroksessa jätetty neljän työpäivän mittainen aikapuskuri, mutta se kasvaa myös 10 työpäivän mittaiseksi kolmannessa kerroksessa, koska jälkimmäinen työvaihe on aikataulun mukaan hitaampi. Kylpyhuoneen alakattorungot ja levytys on aikataulutettu kestäämään kolmannessa kerroksessa viisi työpäivää, jolloin kerroksen viimeiseksi tehtävä huone on 14 työpäivää tyhjiällä, mikäli jälkimmäinen työvaihe suoritetaan huone kerrallaan.

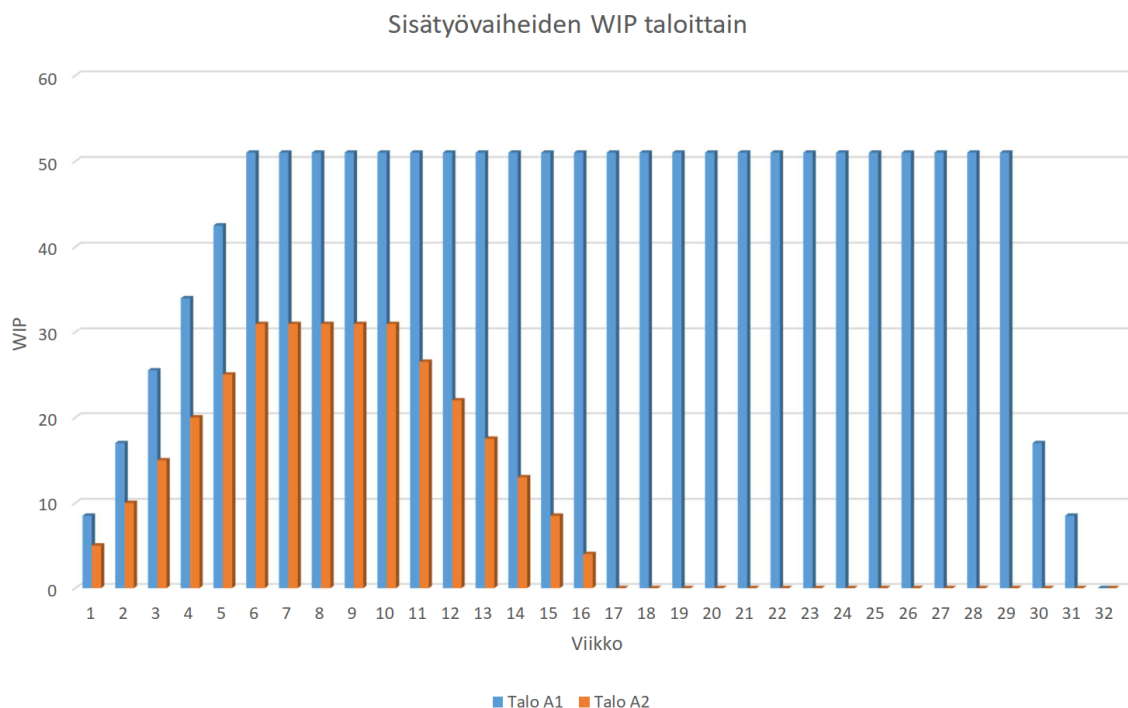
Neljännessä kerroksessa on nostettu esille toimintakokeiden sekä varusteiden ja viimeistelyn välille jätetty 15 työpäivän aikapuskuri. Varusteet ja viimeistely on aikataulutettu kestäämään neljännessä kerroksessa kuusi työpäivää, jolloin viimeiseksi tehtävä huone on tyhjiällä 20 työpäivää näiden kahden työvaiheen välissä, mikäli jälkimmäinen tehtävä suoritetaan huone kerrallaan. On myös huomattavissa, että näiden työvaiheiden välillä olevat puskurit toistuvat jokaisessa kerroksessa. Aikatauluun jätetyt aikapuskurit painottuvatkin projektin loppupuolelle.

A2-talon tahtiaikataulussa ei vastaavia kiinteitä aikapuskureita, toisinsanottuna tyhjän mestan muodossa olevaan hukkaa ole ollenkaan, mikäli hotellihuonetta ja sen kylpyhuonetta tarkastellaan yhtenä mestana. Eli joko hotellihuoneen kylpyhuone, hotellihuone tai molemmat näistä ovat työn alla päivätasolla tarkasteltaessa. Kuvassa 16 on ote A2-talon hotellihuoneiden tahtiaikataulusta, jossa tahtityövaiheet on nimetty H1, H2, H3 ja niin edelleen. Kuvassa 17 on ote A2-talon hotellihuoneiden kylpyhuoneiden aikataulusta.

		Viikko 37										Viikko 38										Viikko 39										Viikko 40									
		9.9.2019	10.9.2019	11.9.2019	12.9.2019	13.9.2019	14.9.2019	15.9.2019	16.9.2019	17.9.2019	18.9.2019	19.9.2019	20.9.2019	21.9.2019	22.9.2019	23.9.2019	24.9.2019	25.9.2019	26.9.2019	27.9.2019	28.9.2019	30.9.2019	1.10.2019	2.10.2019	3.10.2019	4.10.2019	7.10.2019	8.10.2019													
Huone 1	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 2	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 3	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 4	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 5	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 6	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 7	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 8	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 9	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 10	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 11	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 12	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 13	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 14	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 15	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 16	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 17	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 18	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 19	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 20	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 21	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 22	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 23	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 24	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 25	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 26	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 27	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 28	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 29	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 30	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 31	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 32	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 33	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 34	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 35	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 36	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 37	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 38	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 39	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 40	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 41	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 42	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 43	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 44	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 45	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 46	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 47	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 48	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 49	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 50	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 51	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 52	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 53	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 54	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 55	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 56	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 57	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 58	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 59	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 60	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 61	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 62	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 63	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1													
Huone 64	Kaikki	Koivane	Eristys	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H1																											

aika. A2-talon hotellihuoneen tuotantojuna ensimmäinen vaunu H1 on hotellihuoneiden alakatot ja otsat, mikä on vertailukelpoinen aloituspiste. Tahtisuunnitelman mukaan ensimmäisen 51 hotellihuoneen valmistamiseen, ensimmäisen työvaiheen ollessa huoneiden alakattorunkojen ja -otsien teko ja viimeisen työvaiheen ollessa siivous, kuluu 16,5 viikkoa. Tarkoittaen sitä, että tahtiaikataululla toteutettavat 51 hotellihuonetta valmistetaan aikataulun mukaan 15 viikkoa lyhyemmässä ajassa, kuin perinteisellä tuotannolla valmistettavat huoneet. Tämä tarkoittaa siis noin 50% lyhennystä läpimenoajassa tahtiaikataulutetuille työvaiheille.

A1-talon vinoviiva-aikataulun mukaan työvaihe Huoneiden alakattorungot ja -otsat ovat valmiina kaikissa huoneissa kuuden viikon päästä aloituksesta ja viimeinen työvaihe, eli Loppusiivous vaihe 2 alkaa 23,5 viikon kuluttua tästä ajankohdasta ja valmistuu kahdessa viikossa. Tämä tarkoittaa siis sitä, että WIP on ensimmäiselle kuudelle viikolle 0 – 51 hotellihuonetta, jonka jälkeen 23,5 viikkoa WIP on 51 hotellihuonetta ja viimeiselle kahdelle viikolle WIP on 51 – 0 huonetta. Talon A2 tahtiaikataulusta on nähtävissä, että ensimmäinen huone valmistuu 5,5 viikon kuluttua työvaiheen alakattorungot ja -otsat aloittamisesta ja kerrallaan työn alla on maksimissaan 31 hotellihuonetta. Talossa A2 WIP on ensimmäiselle kuudelle viikolle 0 – 31, seuraaville neljälle viikolle WIP on 31 ja viimeiselle kuudelle viikolle WIP on 31 – 0. Tätä WIPin kertymää taloittain on havainnollistettu kuvassa 18.



Kuva 18 Sisätyövaiheiden WIPin kertymät taloittain 51 hotellihuoneen sisätyövaiheessa

7.5.2 Mestakamerat

Videokuvausta toteutettiin kahden viikon ajan vierekkäisissä hotellihuoneissa. Kamera toimi liiketunnistimella ja liiketunnistin oli aktivoituna jokaisena työpäivänä aikavälillä 6:30 – 17:30, lukuun ottamatta viimeistä kuvauspäivää, jolloin kuvaus lopetettiin klo 15:00. Kahden viikon aikaisen mittausjakson aikana tehtiin satunnaisia ylitöitä, mutta näiden vaikutuksen tuloksiin todettiin olevan niin pieni, että selkeyden vuoksi aineistosta päätettiin tarkastella työajalle, eli 7:00 – 15:30 välille, sijoittuneita tapahtumia.

Videomateriaalissa oli muutamia epäselviä tilanteita. Yhdellä kerralla kameran liike-tunnistin ei ollut reagoinut työntekijän saapumiseen huoneeseen ja toisella kerralla videolla ei näy työntekijän poistumista huoneesta. Huoneen 6 eteisen laatoituksen lopetushetkeä ei voida määrittellä tarkasti, koska kameran asettelun vuoksi näkyvyys hotellihuoneen oviaukkoon oli rajoittunut. Kamera myös käännettiin kerran työntekijän toimesta hetkellisesti, jolloin näkyvyys videolla oli rajattu. Näissä epäselvissä tilanteissa tilanne tulkittiin niin, että työntekijä ei ollut huoneessa ja analysointiin otettiin mukaan ainoastaan aika, jolloin voitiin olla varmoja, että työntekijä on mestalla.

Videoiden analysointi ja datan poimiminen videoilta tapahtui manuaalisesti diplomityöntekijän toimesta. Videoilta havainnoitiin kaikki työntekijöiden tulot mestalle ja poistumiset mestalta, mikä mahdollisti mestalla vietetyn ajan analysoinnin. Kuvassa 19 on esitetty satunnaisen päivän otos videoanalyysistä huoneen 6 osalta. Kuvassa on nähtävissä huoneessa ollut työntekijä, huoneeseen tuloaika, huoneesta poistumisaika, poistumisajan ja tuloajan erotuksena saatu mestalla vietetty aika ja tehty työ. Tehty työ kirjattiin ylös, mikäli se oli selkeästi tunnistettavissa videolta. Otteen oikeassa reunassa näkyy tulo- ja poistumisajat järjestettynä aikajärjestykseen, mikä tehtiin siksi, että päästiin käsiksi aikaan, jolloin huone on ollut tyhjänä. Tulo- ja poistumisajat tuli järjestää aikajärjestykseen, koska aikaisemmin huoneeseen tullut urakoitsija saattoi poistua huoneesta myöhemmin kuin hänen jälkeensä huoneeseen tullut urakoitsija.

Huone 6					Tulo- ja poistumisajat järjestyksessä		
Urakoitsija	Tuloaika	Poistumisaika	Vietetty aika	Tehty työ	Tuloajat	Poistumisajat	Mesta tyhjiällä ennen seuraavaa
Laattamies 2	7:07:38	7:08:01	0:00:23	-	7:07:38	7:07:59	0:00:00
Laattamies 3	7:07:41	7:07:59	0:00:18	-	7:07:41	7:08:01	0:02:21
Laattamies 1	7:10:22	7:11:24	0:01:02	-	7:10:22	7:11:03	0:00:00
Laattamies 2	7:10:48	7:11:03	0:00:15	-	7:10:48	7:11:24	0:01:48
Laattamies 1	7:13:12	7:18:29	0:05:17	kph lattian laatoitus	7:13:12	7:18:29	0:01:47
Laattamies 1	7:20:16	7:31:10	0:10:54	kph lattian laatoitus	7:20:16	7:31:08	0:00:00
Laattamies 2	7:31:00	7:31:08	0:00:08	-	7:31:00	7:31:10	0:01:33
Laattamies 2	7:32:43	7:32:47	0:00:04	-	7:32:43	7:32:47	0:00:00
Laattamies 1	7:32:45	7:37:51	0:05:06	kph lattian laatoitus	7:32:45	7:34:03	0:00:00
Laattamies 2	7:33:42	7:34:03	0:00:21	-	7:33:42	7:37:51	0:00:42
Laattamies 1	7:38:33	7:51:45	0:13:12	kph lattian laatoitus	7:38:33	7:42:46	0:00:00
Laattamies 2	7:42:38	7:42:46	0:00:08	-	7:42:38	7:50:37	0:00:00
Laattamies 3	7:50:24	7:50:37	0:00:13	-	7:50:24	7:51:45	0:00:45
Laattamies 1	7:52:30	8:16:18	0:23:48	kph lattian laatoitus	7:52:30	7:53:18	0:00:00
Laattamies 2	7:53:05	7:53:18	0:00:13	-	7:53:05	8:06:48	0:00:00
Laattamies 2	8:06:39	8:06:48	0:00:09	-	8:06:39	8:16:18	0:02:28
Laattamies 1	8:18:46	8:18:52	0:00:06	-	8:18:46	8:18:52	0:01:19

Kuva 19 Satunnainen otos videoanalyysistä

Ajalla, jolloin mesta oli videoanalyysin mukaan tyhjiällä, päästiin käsiksi mestan toteutuneeseen käyttöasteeseen. Mestän toteutunutta käyttöastetta verrattiin tahtisuunnitelman työkuormalaskennasta saatuun mestan suunniteltuun käyttöasteeseen. Suunniteltu käyttöaste määritettiin tahtisuunnitelman työvaiheiden kestojen mukaan, jakamalla se aktiivisen työpäivän osuudella, eli *työaika – viralliset tauot*, joka on 7 tuntia ja 36 minuuttia. Taulukossa 3 on esitetty vertailu mestan toteutuneista ja suunnitelluista käyttöasteista eri tavoilla laskettuna. Toteutunut käyttöasteen keskiarvo mitatuissa huoneissa kertoo molempien huoneiden päivittäisten käyttöasteiden keskiarvon. Toteutunut käyttöasteen keskiarvo mitatuissa huoneissa laskettiin myös huomioiden vain yli viiden minuutin käynnit. Tämä tehtiin soveltaen Zhao et al. (2019) olettaa 10 minuutin rajaa arvoa tuottavalle työlle. Kuten esimerkiksi kuvassa 19 esitettyssä otteesta on nähtävissä, arvoa tuottavaa työtä tehtiin myös alle 10 minuutin jaksoissa, joten tähän tarkasteluun valittiin raja-arvoksi viisi minuuttia.

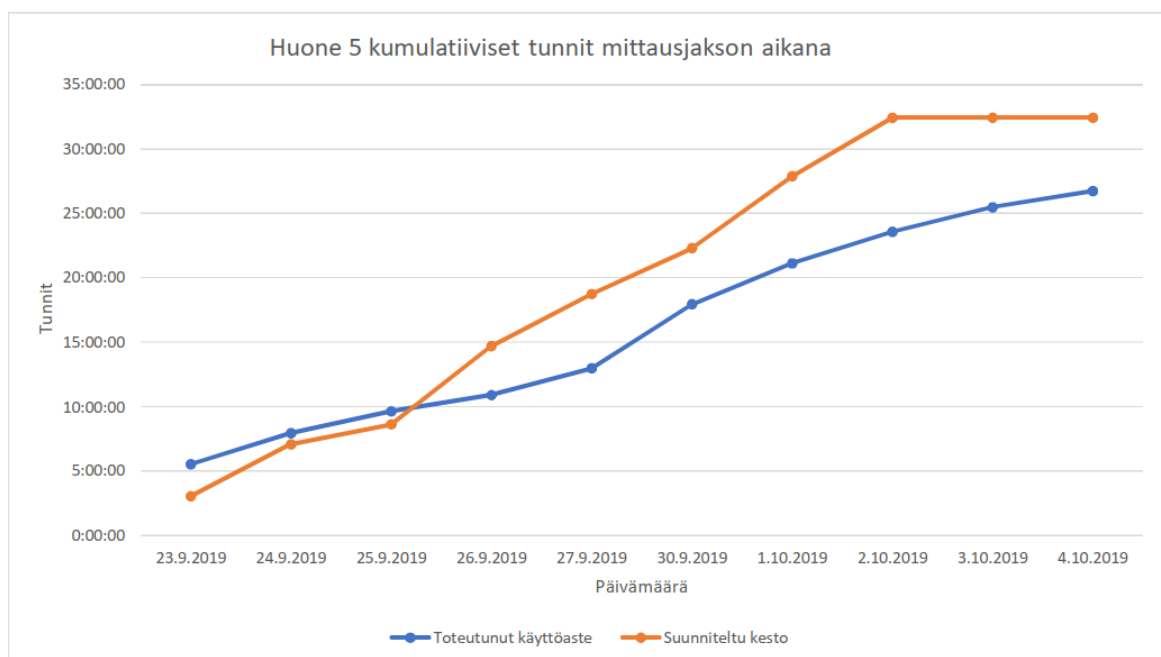
Kuten jo todettiin, tahtituotanto ei edennyt täydellisesti tahtisuunnitelman mukaan, joten taulukkoon 3 laskettiin suunniteltu käyttöaste muutamien eri tavoin. Toteutuneen tuotannon mu-

kainen suunniteltu käyttöaste kertoo, mikä keskiarvollinen käyttöaste olisi ollut, mikäli toteutuneiden työvaiheiden käyttöasteet olisivat vastanneet työkuormalaskennan mukaisia käyttöasteita. 26.9 muutetun tahtisuunnitelman käyttöaste kertoo, keskiarvollisen suunnitelman käyttöasteen mittausjaksolle, mikäli työvaiheet olisivat edenneet 26.9.2019 muutetun tahtisuunnitelman mukaan. Alkuperäisen tahtisuunnitelman mukainen suunniteltu käyttöaste mittausjaksolle kertoo taas mikä suunniteltu käyttöaste mittausjaksolle olisi ollut, mikäli työvaiheet olisivat edenneet alkuperäisen tahtisuunnitelman mukaan. Alkuperäisen tahtisuunnitelman mukainen suunniteltu käyttöaste koko tahtijunalle on myös esitetty taulukossa.

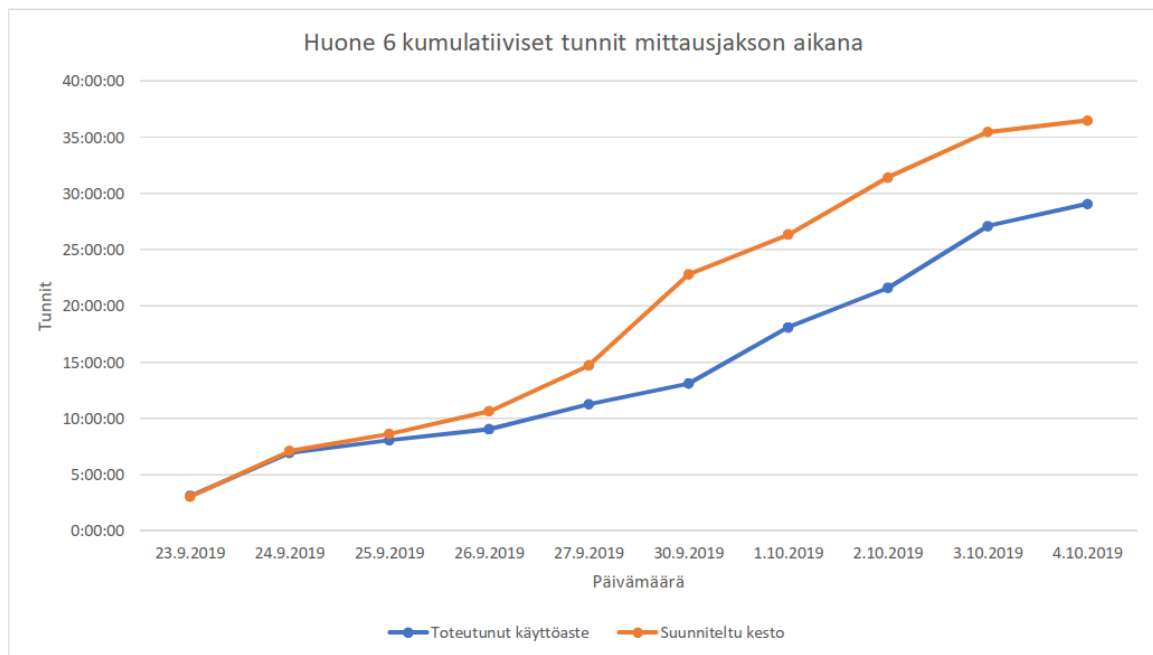
Taulukko 3 Mestan toteutuneet ja suunnitellut käyttöasteet eri tavoin laskettuna

	% Käyttöaste
Toteutunut käyttöasteen keskiarvo mitatuissa huoneissa	37 %
Toteutunut käyttöasteen keskiarvo mitatuissa huoneissa, vain yli 5 min. käynnit huomioitu	31 %
Toteutuneen tuotannon mukainen suunniteltu käyttöaste mitatuille huoneille mittausjakson aikana	43 %
26.9 Muutetun tahtisuunnitelman mukainen suunniteltu käyttöaste mitatuille huoneille mittausjakson aikana	46 %
Alkuperäisen tahtisuunnitelman mukainen suunniteltu käyttöaste mitatuille huoneille mittausjakson aikana	59 %
Alkuperäisen tahtisuunnitelman mukainen suunniteltu keskiarvollinen käyttöaste koko tuotantojunalle	64 %

Kuvissa 20 ja 21 on esitetty huoneittain sekä toteutuneet että suunnitellut kumulatiiviset työtunnit mittausjaksolle. Toteutuneen käyttöasteen mukaiset tunnit on laskettu huonekohtaisista päivittäisistä käyttöasteista ja suunnitellun keston mukaiset tunnit on laskettu toteutuneen tuotannon mukaan työkuormalaskennan työtehtävien kestoista. Huoneen 5 osalta kuvaajassa huomioitavaa on, että siellä ei tehty kahtena viimeisenä päivänä mitään suunniteltuja työvaiheita, vaan videoanalyysistä käy ilmi, että huoneessa tehtiin tahtituotantoon kuulumattomia töitä, jotka olivat määritetty tehtäväksi ennen tahtituotannon alkamista. Nämä työt huoneen 5 osalta liittyivät sadevesiviemärin eristykseen sekä äänieristykseen. Kuvaajista nähdään molempien huoneiden osalta suunniteltujen kumulatiivisten tuntien olleen suuremmat kuin toteutuneen käyttöasteen mukaiset kumulatiiviset tunnit, mikä osaltaan selittääkin sitä, että suunniteltu käyttöaste on ollut suurempi kuin toteutunut.



Kuva 20 Huoneen 5 kumulatiiviset työskentelytunnit mittausjaksolla



Kuva 21 Huoneen 6 kumulatiiviset työskentelytunnit mittausjaksolla

Työvaiheiden kestoja ja käyttöasteita vertailtiin myös vaunukohtaisesti. Taulukkoon 4 on koottu vaunukohtainen vertailu, jossa on esitetty huonekohtaisesti käyttöaste työvaiheen sisällä, vaunun toteutunut kesto huoneessa sekä työkuormalaskennasta saatu suunniteltu kesto. Käyttöaste työvaiheen sisällä tarkoittaa mestan käyttöastetta aikavälillä: vaunun ensimmäinen tunnistettu työ mestalla – vaunun viimeinen tunnistettu työ mestalla. Vaunun aloitus- ja lopetushetkien määrittämiseen ei käytetty mitään aikarajaa, kuten esimerkiksi ensimmäinen yli 10 minuutin läsnäolo, vaan hetkien tunnistaminen tehtiin videoanalyysissä kirjattujen, käynneillä tehtyjen töiden mukaan. Tämä valinta tehtiin, koska videoanalyysistä havaittiin, että mestalla vietetyn yhtäjaksoisen ajan perusteella on vaikeaa määrittää, onko työntekijä tehnyt arvoa tuottavaa työtä vai ei. Tästä esimerkkinä toimii kuvassa 22 esitetty vaunun H3 työt, jossa arvoa tuottava työ, eli esimerkiksi lattian primerointi, on suoritettu olemalla läsnä mestalla vain 2 minuuttia ja 15 sekuntia. Käyttöaste työvaiheen sisällä antaa viitteitä työvaiheen työn virtauksesta, eli siitä kuinka paljon hukkaa työn virtauksessa on ollut. Toisaalta vertailemalla saman vaunun käyttöasteita työvaiheen sisällä eri huoneissa keskenään, päästään käsiksi työn virtauksessa ilmenevään vaihteluun. Työvaiheiden sisäisten käyttöasteiden keskiarvoksi saatiin 74 %. Työvaiheiden sisäisissä käyttöasteissa on havaittavissa kaksi suurta poikkeamaa: vaunuissa K8 ja H5. Videoanalyysin perusteella näissä vaunuissa havaitut alhaiset työvaiheen sisäiset käyttöasteet ovat johtuneet tilanteista, joissa työvaihe on tehty ensin osittain ja jatkettu myöhemmin loppuun, jolloin mesta on ollut työtehtävän aloituksen ja lopetuksen välissä tyhjillään.

Toteutuneet kestot ja suunnitellut kestot on taulukossa 4 ilmoitettu muodossa: *tunnit:minuuttit*. Vertaamalla toteutuneita kestoja suunniteltuihin kestoihin, nähdään kuinka hyvin työkuormalaskennassa tehdyt arviot työvaiheiden kestosta ovat olleet lähellä totuutta ja onko työkuormalaskennan arvioissa ollut systemaattisia virheitä vai johtuvatko poikkeamat vaihtelusta. Vertailemalla vaunujen toteutuneita ja suunniteltuja kestoja on huomattavissa, että osan vaunuista, kuten vaunujen K7 ja K9 on arvioitu kestävän hieman kauemmin kuin toteutuman mukainen kesto, kun taas osan vaunuista, kuten K10, on arvioitu kestävän hieman vähemmän kuin toteutunut kesto. Taulukosta on havaittavissa myös suurempi poikkeamia,

kuten vaunu H3, joka on molemmissa huoneissa saatu suoritettua alle kymmenessä minuutissa, vaikka sen on arvioitu kestävän kaksi tuntia. Tästä työvaiheesta kommentiksi onkin kirjattu, että pohjatöiden arvioitiin olevan laajempia, arviossa olikin varauduttu lattian ta-soittamiseen. Vaunun K8 kesto on huoneessa 5 poikkeuksellisen korkea, mutta tämä on selitettävissä matalan käyttöasteen avulla. Huone on siis tämän kirjatun toteutuneen keston aikana ollut suurimman osan ajasta tyhjiällä. Vaunun K6 huonekohtaisissa kestoissa on myös suuri ero. Kommenttina kirjattu kahden asentajan työskentely selittää eroa huoneiden välillä, mutta verrattuna työkuormalaskennan mukaiseen keston antaa viitteitä siitä, että työvaiheen kesto on arvioitu aika paljon toteutunutta lyhyemmäksi.

Taulukko 4 Vaunukohtainen vertailu huoneittain työvaiheen sisäisistä käyttöasteista sekä toteutuneista ja suunnitelluista kestoista

Vaunu	Käyttöaste työvaiheen sisällä		Toteutunut kesto		Suunniteltu kesto	Kommentti
	Huone 5	Huone 6	Huone 5	Huone 6	Työkuormalaskenta	
K6 Väliseinä tuplaus	75 %	70 %	7:15	3:33	3:00	Huoneessa 6 kaksi asentajaa töissä, huone 6 klo 13:53 ei näy millon asentajat ovat tulleet huoneeseen
K7 VE 1. krs	69 %	83 %	3:14	2:41	4:00	
K8 VE 2.krs	28 %	67 %	5:51	1:03	1:30	
K9 Laatat lattia	75 %	79 %	2:31	3:18	4:00	Huoneessa 6 työ jakautui kahdelle päivälle
K10 Laatat seinä	81 %	86 %	8:34	9:22	7:00	Jakautui molemmissa huoneissa kahdelle päivälle
K11 Sauma	79 %	78 %	2:54	5:54	4:00	Huoneessa 5 työ jakautui kahdelle päivälle
K13 Silikonit	100 %	100 %	0:35	0:24	1:00	
H3 Eteinen laat.poh.	81 %	74 %	0:09	0:08	2:00	Pohjatyöt oli arvioitu laajemmiksi
H4 Laatat lattia	72 %	63 %	1:00	0:55	4:00	Huone 6 videolla ei näy laatoituksen loppuosa
H5 Laatat lattia sauma	77 %	35 %	0:20	0:52	1:30	

Huone 6				
Urakoitsija	Tuloaika	Poistumisaika	Vietetty aika	Tehty työ
Vedeneristäjä 1	12:08:35	12:08:37	0:00:02	
Vedeneristäjä 1	12:09:19	12:12:04	0:02:45	Eteisen lattian imurointi
Sähkömies, nokka	12:12:34	12:13:42	0:01:08	
Timpuri 3	12:12:36	12:13:40	0:01:04	
Vedeneristäjä 1	12:15:21	12:17:36	0:02:15	Eteisen lattian primerointi

Kuva 22 Esimerkki vaunun H3 työstä

Mestakameroilla saadusta datasta ilmeni myös, että huoneissa oli huomattava määrä käyn-tejä päivän aikana. Kahden viikon aikana varsinaiselle työajalle ajoittuvia käyn-tejä mitatta-vissa huoneissa oli yhteensä 1590, mikä tarkoittaa keskiarvollisesti 79,5 käyntiä huoneessa päivän aikana. Taulukkoon 5 on koottu eri tavoin laskettuna mittausjaksolla ilmenneet käyn-nit mestoilla, käyntien päiväkohtainen keskiarvo huonetta kohden ja näiden käyntien mu-kaan laskettu mestan käyttöaste. Taulukosta nähdään, että valtaosa käynneistä on ollut ly-hyitä, alle viiden minuutin käyn-tejä. Käyttöaste alle viiden minuutin käyn-neillä jää kuitenkin suhteellisen pieneksi huomioiden, että kuten kuvassa 22 on esitetty, osa alle viiden minuutin käynneistäkin on sisältänyt arvoa tuottavaa työtä.

Taulukko 5 Mittausjakson aikana havaitut käynnit mestoilla eri tavoin laskettuna ja niiden mukaiset käyttöasteet

	Käyntien määrä	Käyntien määrän keskiarvo huoneittain yhden päivän aikana	Käyttöaste
Kaikki käynnit mittausjakson aikana	1590	79,5	37 %
Yli 10 min käynnit mittausjakson aikana	91	4,6	25 %
Yli 5 min käynnit mittausjakson aikana	162	8,1	31 %
Alle 5 min käynnit mittausjakson aikana	1428	71,4	6 %

Huomioiden kaikki 1590 käyntiä mestalla, saadaan käyntien keskipituudeksi 2 minuuttia ja 26 sekuntia. Käyn-tejä tarkasteltiin myös huonekohtaisesti päivittäin, jotta päästäisiin käsiksi

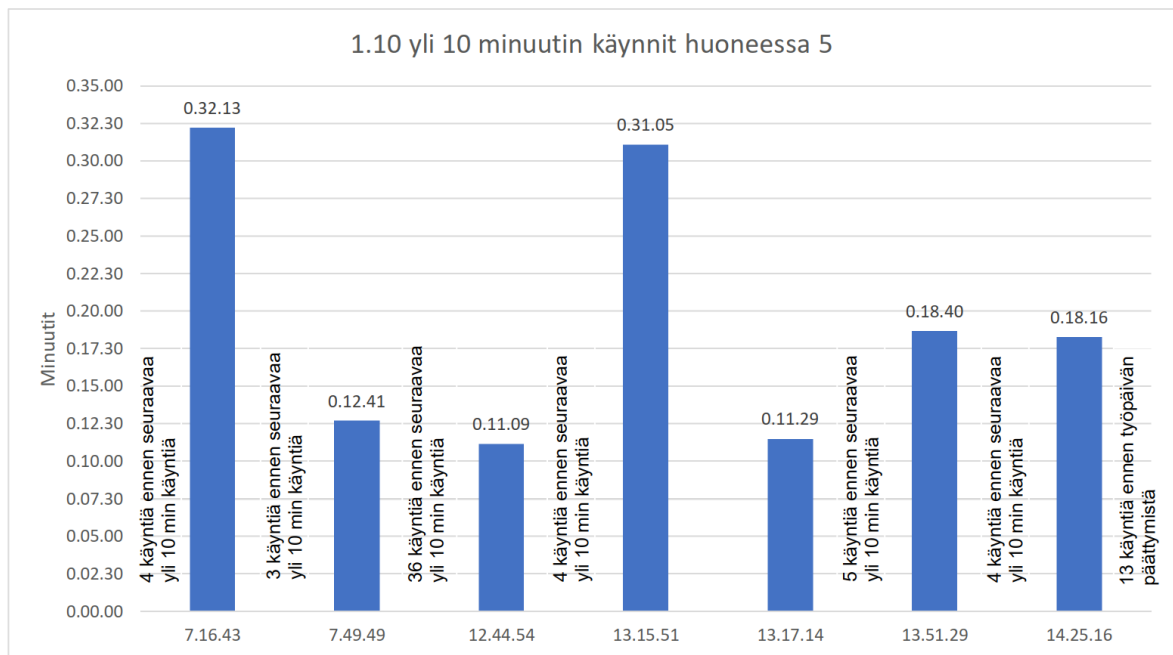
niissä ilmenevään vaihteluun. Huoneiden päiväkohtaisten käyntien lukumäärän keskihajonta oli 22,7 ja huoneissa kävi päivän aikana keskimäärin 14 eri työntekijää. Keskihajonta kertoo arvojen keskimääräisen poikkeaman keskiarvosta, jolloin päivittäisten käyntien osalta saatu luku 22,7 vaikuttaa melko suurelta vaihtelulta. Taulukkoon 6 on eritelty huonekohtaiset käynnit päivittäin, käyntien keskipituudet, käyntien pituuksien keskihajonnat ja mestalla käyneiden eri työntekijöiden lukumäärä. Käyntien keskipituudet ja käyntien pituuksien keskihajonnat ovat ilmoitettu muodossa: *tunnit:minuutit:sekunnit*. Taulukosta on havaittavissa paljon päivä- ja huonekohtaista vaihtelua niin käyntien lukumäärässä, käyntien keskipituudessa, käyntien pituuden keskihajonnassa kuin mestalla käyneiden eri työntekijöiden määrässäkin.

Taulukko 6 Päiväkohtainen tarkastelu käynneille eri huoneissa

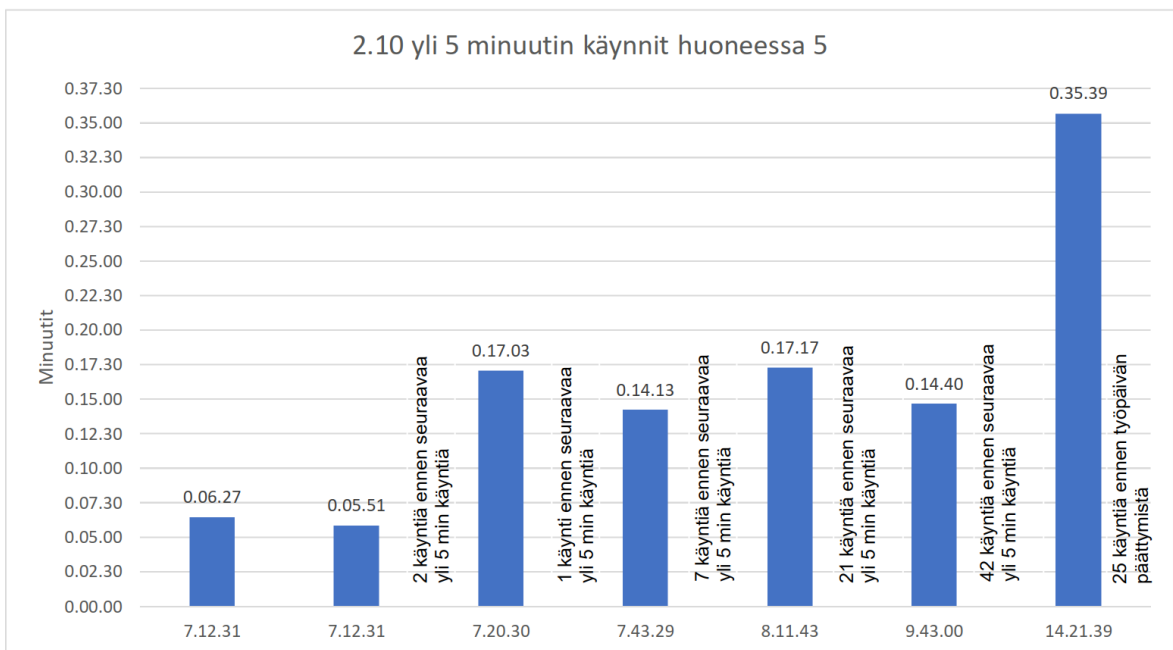
	HUONE 5			
	Käyntien lukumäärä	Käyntien keskipituus	Käyntien pituuden keskihajonta	Eri työntekijöiden määrä
23.9.2019	103	0:03:27	0:06:41	13
24.9.2019	82	0:01:58	0:06:03	12
25.9.2019	76	0:01:28	0:04:44	18
26.9.2019	78	0:01:05	0:02:06	13
27.9.2019	50	0:02:38	0:08:45	7
30.9.2019	81	0:04:43	0:11:28	14
1.10.2019	76	0:02:54	0:06:12	15
2.10.2019	105	0:01:38	0:04:34	18
3.10.2019	89	0:01:25	0:02:47	21
4.10.2019	36	0:02:19	0:04:26	14

	HUONE 6			
	Käyntien lukumäärä	Käyntien keskipituus	Käyntien pituuden keskihajonta	Eri työntekijöiden määrä
23.9.2019	133	0:02:10	0:04:19	14
24.9.2019	72	0:03:22	0:09:41	17
25.9.2019	89	0:01:06	0:02:29	24
26.9.2019	63	0:01:38	0:04:45	18
27.9.2019	65	0:02:17	0:08:41	14
30.9.2019	62	0:02:02	0:03:58	10
1.10.2019	67	0:04:47	0:10:58	14
2.10.2019	102	0:02:14	0:06:38	10
3.10.2019	105	0:03:32	0:10:25	12
4.10.2019	56	0:02:04	0:05:46	9

Kuvissa 23 ja 24 on havainnollistettu yksittäisten huoneiden käyntejä päivän aikana pylväsdiagrammin avulla. Kuvattavat päivät on valittu joukosta satunnaisesti. Diagrammin vaakakselilla on esitetty diagrammissa kuvattujen käyntien tuloajat huoneeseen ja pylväiden päällä on mestalla läsnä oltu aika. Pylvään korkeus korreloi mestalla vietetyn ajan kanssa ja aika-akseli onkin esitetty pystyakselilla. Kuvaan 23 on kuvattu 1.10.2019 yli kymmenen minuutin käynnit huoneessa 5. Pylväiden välissä olevat huomiot kuvaavat kuinka monta muuta käyntiä, eli alle kymmenen minuutin käyntiä huoneeseen on tullut ennen seuraavan yli kymmenen minuutin käynnin tuloaikaa. 1.10.2019 huoneessa 5 oli yhteensä 76 käyntiä työpäivän aikana, joista seitsemän oli yli kymmenen minuuttia kestäviä. Alle kymmenen minuutin käyntien, eli muiden 69 käynnin keskiarvollinen pituus oli 1 minuutti ja 14 sekuntia. Kuvassa 24 on taas tarkasteltu yli viiden minuutin käyntejä 2.10.2019 huoneessa 5. Käyntejä huoneessa oli yhteensä 105 kappaletta, joista seitsemän käyntiä oli yli viiden minuutin mittaisia. Loput 98 käyntiä ovat siis olleet alle viiden minuutin mittaisia ja niiden keskipituus on ollut 36 sekuntia.



Kuva 23 1.10.2019 yli 10 minuutin käynnit huoneessa 5



Kuva 24 2.10.2019 yli 5 minuutin käynnit huoneessa 5

7.5.3 Systemaattinen havainnointi

Kuten edellisessä aluvuossa mainittiinkin, havainnoinnilla havaittiin työpakettien, eli vau-
nujen, todelliset suorituspäivät. Kuvassa 25 on yllämainittujen hotellihuonei-
den ja niiden kylpyhuoneiden alkuperäinen tahtisuunnitelma, keskimmäisenä on kesken mit-
tausjakson, 26.9.2019, muutettu tahtisuunnitelma ja alimpana on havaintojen mukaan toteu-
tunut aikataulu. Verrattessa 26.9.2019 muutettua aikataulua toteutuneeseen aikatauluun, voi-
daan huomata, että kaikki suunnitellut työvaiheet saatiin suoritettua mittausjakson aikana,
lukuun ottamatta viimeisenä päivänä huoneeseen 5 aikataulutettua hotellihuoneen ja hotelli-
huoneen kylpyhuoneen alakattotöitä.

ALKUPERÄINEN			Viikko 39					Viikko 40				
Huone / aikataulu	Kerros	Huoneet pohjat	23.9.2019	24.9.2019	25.9.2019	26.9.2019	27.9.2019	30.9.2019	1.10.2019	2.10.2019	3.10.2019	4.10.2019
Huone 5	4	A4051		H3	H4		H5			H6	H7	H8
Huone 6	4	A4047			H3	H4		H5			H6	H7
Kylpyhuone 5	4	A4052	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16
Kylpyhuone 6	4	A4048	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
MUUTETTU (26.9)			Viikko 39					Viikko 40				
Huone / aikataulu	Kerros	Huoneet pohjat	23.9.2019	24.9.2019	25.9.2019	26.9.2019	27.9.2019	30.9.2019	1.10.2019	2.10.2019	3.10.2019	4.10.2019
Huone 5	4	A4051				H3	H4		H5			H6
Huone 6	4	A4047				H3	H3	H4		H5		
Kylpyhuone 5	4	A4052			K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
Kylpyhuone 6	4	A4048	K6			K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13
TOTEUTUNUT HAVAINTOJEN MUKAAN			Viikko 39					Viikko 40				
Huone / aikataulu	Kerros	Huoneet pohjat	23.9.2019	24.9.2019	25.9.2019	26.9.2019	27.9.2019	30.9.2019	1.10.2019	2.10.2019	3.10.2019	4.10.2019
Huone 5	4	A4051				H3,H4				H5		
Huone 6	4	A4047				H3		H4		H5		
Kylpyhuone 5	4	A4052	K6	K7	K8		K9	K10	K10,K11	K11,K13		
Kylpyhuone 6	4	A4048	K6	K7	K8		K9	K9	K10	K10	K11	K13

Kuva 25 Alkuperäinen, kesken mittausjakson muutettu ja toteutunut tahtiaikataulu

Pistokoemaisesti toteutetuilta havainnointikierroksilta havaintoja saatiin yhteensä 146 kappaletta, eli 73 kappaletta yhtä huonetta kohden. Havainnointikierroista työntekijä oli mestalla 69 kertaa ja työntekijä oli poissa mestalta 77 kertaa. Poissaolojen syitä analysoitiin tämän diplomityön liitteenä olevan ”Liite 1: Havainnointilomake 1” mukaisesti. Poissaolojen syyt ja kuinka monta kertaa kyseinen syy havaittiin, on esitetty taulukossa 7. Havainnoista, jolloin työntekijät puuttuivat, on 24 kertaa kirjattu työntekijän olleen joko edellisellä tai jollain muulla mestalla töissä ja kuudella kerralla kommentiksi kirjattiin asentajan olevan sairaana. Havainnoista, jolloin tila ei ollut käytettävissä tai vapaana, on kymmenen kertaa esteeksi kirjattu jonkin materiaalin tai asennuksen kuivuminen mestalla ja yhden kerran asentajalla ei ollut lupaa aloittaa ennen kuin sähkörasiaan tehtävä korjaus on tehty. Tarvikkeiden ja materiaalien puuttumiseen liittyvissä havainnoissa työntekijät joko työstivät materiaaleja mestan ulkopuolella tai olivat hakemassa materiaalia muualta.

Taulukko 7 Havainnoinnissa tunnistetut syyt työntekijän poissaololle mestalta

Syy työntekijän poissaololle	kpl
Työntekijät puuttuvat	30
Tarvikkeet/materiaalit puuttuvat	3
Työntekijä tauolla	4
Suunnitelman mukainen työ on tehty	29
Tila ei ole käytettävissä/vapaana	11

Pistokoemaisesti toteutetun mestojen havainnoinnin lisäksi havainnointia suoritettiin työmaalla pidettävissä palaverissa. Työmaalla oli määritetty pidettäväksi päivittäisjohtamisen palaverit aamuittain tahtituotannossa olevien työntekijöiden ja pääurakoitsijan työnjohdon kesken, urakoitsijapalaveri viikoittain kohteen aliurakoitsijoiden ja pääurakoitsijan työnjohdon kesken sekä mestaripalaveri viikoittain pääurakoitsijan työmaatoimihenkilöiden kesken. Näiden lisäksi mittausjaksolla pidettiin yksi ylimääräinen aikataulupalaveri talotekniikkaurakoitsijoiden ja pääurakoitsijan työnjohdon kanssa.

Havainnoista käy ilmi, että aamupalavereita pidettiin ainoastaan kahtena päivänä mittausjakson aikana. Mittausjakson kahtena ensimmäisenä päivänä paikalla oli joitakin aliurakoit-

sijoita, mutta ei pääurakoitsijan työnjohtoa, joten palavereita ei pidetty. Ensimmäisessä pidetyssä aamupalaverissa, 25.9.2019, osallistuminen oli kuitenkin huonoa ja paikalla oli vain pääurakoitsijan työnjohtaja, sähköasentaja ja laatoittaja. Toinen pidetty palaveri, 26.9.2019, liittyi aikatauluun tehtyihin muutoksiin ja tässä palaverissa oli läsnä kolmen eri aliurakoitsijan työnjohtajat, kahden eri aliurakoitsijan asentajat sekä pääurakoitsijan työnjohtaja ja työmaainsinööri. 27.9.2019 paikalla oli neljän eri aliurakoitsijan asentajat, mutta ei pääurakoitsijan työnjohtoa, joten palaveria ei pidetty. Tämän jälkeen palavereissa ei ollut yhtään urakoitsijoita paikalla, joten loput aamupalaverit jäivät pitämättä. Molemmissa pidetyissä mestaripalavereissa kuitenkin huomautettiin aamupalaverien pitämisen tärkeydestä, mutta sillä ei ollut juurikaan vaikutusta asiaan.

Ensimmäisestä pidetystä aamupalaverista, eli 25.9.2019 havainnoiksi saatiin, että laatoitus-työt olivat myöhässä, koska tieto käytettävästä sauma-aineesta saatiin liian myöhään. Tämä ei kuitenkaan suoraan koskenut tarkastelun alla olevia huoneita 5 ja 6, vaan saumaukset olivat myöhästyneet edellisissä huoneissa. 26.9.2019 järjestetyssä tahtisuunnitelmaa muutettiin kuvan 25 mukaisesti, koska huoneissa 1 ja 2 oli asennettu kylpyhuoneen seiniin kuljetuksessa vaurioitunutta laattaa ja ne jouduttiin purkamaan. Huoneessa 3 oli myös ongelmia vanhan betoniseinän suoruuden kanssa, koska seinän oikaisu suoritettiin liian myöhään. Tämän vuoksi laatoitusta seuraavia työvaiheita siirrettiin viikolla eteenpäin ja niiden etenemisjärjestys muutettiin alkamaan huoneesta 4.

Muista pidetyistä palavereista havaintona oli, että toteumien mukaan täytettyä tahtiaikataulua ei tarkasteltu missään palaverissa, vaan tahtituotannon todettiin olevan joko ”hieman myöhässä” tai ”suurin piirtein aikataulussa”. Aliurakoitsijat ilmoittivat palavereissa joistakin edellisten työvaiheiden virheistä, jotka haittasivat heidän asennuksiaan, kuten että sähköasiat olivat vinossa tai väliseinän ruuveja ei oltu asennettu tarpeeksi syvälle. Osa aliurakoitsijoista ilmoitti palavereissa olevansa huolissaan materiaalien varastointitilasta kerroksissa. Yhdessä urakoitsijapalaverissa todettiin jo aloittaneiden tahtityövaiheiden olevan hieman myöhässä, mutta aliurakoitsija, joka ei ollut vielä aloittanut työvaihettaan ilmoitti aloittavansa kahden päivän päästä työnsä aikataulun mukaisesti, eikä tätä asiaa kommentoitu palaverissa mitenkään.

8 Yhteenveto ja pohdinta

8.1 Tulosten arviointi ja pohdinta

Ensimmäisen tapaustutkimuksen hypoteesiksi muodostui kirjallisuuden pohjalta se, että tahtituotannossa olisi vähemmän tyhjän tilan muodossa olevaa hukkaa, johtuen tuotannon pus-kuroinnista kapasiteettipuskureilla, kiinteiden aikapuskureiden sijaan. Tutkimuksen empii-risessä osuudessa huomattiinkin aikatauluja vertailemalla, että tahtiaikataululla saadaan ra-dikaalisti vähennettyä hukkaa tuotteen virtauksesta suunnitelmallisella tasolla. Tämä näh-dään esimerkiksi siitä, että tahtituotannolla toteutettavalle osalle voidaan aikataulujen perus-teella laskea olevan 50 % lyhyempi läpimenoaika. Tämä lyhennys läpimenoajassa vaikuttaa tavanomaiselta, kun sitä vertaa kirjallisuuskatsauksessa esitettyihin aiemmin tehtyihin tutki-muksiin, jotka ovat mitanneet tahtituotannolla saavutettuja aikataulusäästöjä (mm. Frandson et al. 2013; Dlouhy et al. 2016). Aiemmin tehtyjen tutkimusten tuloksissa on kuitenkin jon-kin verran vaihtelua. Heinonen ja Seppänen (2016) sekä Binninger et al. (2018) esittelemissä tuloksissa, joissa läpimenoajan lyhennys oli ollut suurin, epäiltiin sen jo aiemmin johtuneen lyhyestä, tunti- tai minuuttitasolla, määritetystä tahtiajasta. Taulukkoon 8 on tämän tutki-muksen case-kohteella täydennetty vertailu tahtituotannon läpimenoajan lyhennyksiä tutki-neita tutkimuksia esittävään taulukkoon.

Taulukko 8 Kirjallisuudessa tahtiaikataululla lyhentyneitä läpimenoaikoja esittäneiden tutkimusten vertautuminen case-kohteen läpimenoajan teoreettiseen lyhennykseen

Lähde	Saavutettu lyhennys läpimenoajassa
Frandsen & Tommelein (2014) Automatic generation of a daily space schedule	14 % lyhennys läpimenoajassa
Faloughi et al. (2015) Wip design in a construction project using takt time planning	20 % lyhennys läpimenoajassa
Binninger et al. (2018) Short Takt time in construction—a practical study	70 % lyhennys läpimenoajassa
Dlouhy et al. (2016) Three-level Method of Takt Planning and Takt Control –A New Approach For Designing Production System in Construction	55 % lyhennys läpimenoajassa
Frandsen et al. (2013) Takt time planning for construction of exterior cladding	50 % lyhennys läpimenoajassa
Heinonen & Seppänen (2016) Takt time planning in cruise ship cabin refurbishment: Lessons for lean construction	73 % lyhennys läpimenoajassa
Case-kohde: Vallila Folks Hotel	50 % lyhennys läpimenoajassa

Tarkastelemalla kriittisesti talon A1 vinoviiva-aikataulua huomataan, että siinä ei ole hyödynnetty lähes ollenkaan Kenley ja Seppänen (2010, s. 201 - 249) kuvaamia LBMS-menetelmän optimointioppeja, kuten työvaiheiden tahdistaminen etenemään samoilla tuotantonopeuksilla, jatkuva tuotanto työryhmille mestojen läpi tai pieneen eräkokoon pyrkiminen. Kuten kirjallisuuskatsauksessa huomattiin myös hukkaa mitanneiden tutkimusten osalta, tutkimusten tuloksissa ilmenee vaihtelua, riippuen mitä ja miten ollaan mitattu. Kun A2-talon tahtiaikataulua verrataan huonosti optimoituun A1-talon vinoviiva-aikatauluun, on merkittävät säästöt läpimenoajassa luonnollisia. Aiemmin tehtyt, taulukossa 8 esitetyt, tutkimukset eivät juurikaan ota kantaa minkälaiseen aikatauluun verrattuna tulokset on saavutettu, joten vaihtelu eri tutkimusten välillä saattaa johtua osittain myös vertailupohjana toimivan aikataulun laadusta.

Case-kohteen talon A1 vinoviiva-aikataulusta olikin tunnistettavissa useita jaksoja, jolloin yksittäinen mesta oli tyhjillään noin kolmen viikon ajan, jolloin mesta niin sanotusti odotti työntekijää. Näiden tyhjillään olo -jaksojen voidaan joskus nähdä olevan jopa toivottuja tilapuskureita tuotannossa (Sacks 2016). Toisaalta tilan tyhjillään olo voidaan nähdä myös tarpeettomana WIP:inä. Faloughi et al. (2015) esittelemästä WIP:ien kategorisoinnista on tunnistettavissa, että tämä johtuu kategoriasta ”WIP peräkkäisille tehtäville”, jonka molempia alakategorioita, eli ”WIP yhden työvaiheen sisällä” ja ”WIP eri työvaiheiden välillä” on havaittavissa enemmän talon A1 vinoviiva-aikataulusta kuin talon A2 tahtiaikataulusta.

WIP eri työvaiheiden välillä nähdään johtuvan siitä, että työvaiheet etenevät eri nopeuksilla (Faloughi et al. 2015). Tämä on tahtiaikataulussa estetty suunnittelemalla kaikki työpaketit saman pituisen tahtiajan kestoiseksi (Haghsheno et al. 2016). Tämä ilmiö oli helposti havaittavissa myös vertaillen case-kohteen eri talojen aikatauluja. Talon A1-vinoviiva aikataulussa puskuria oli jätetty kerrokseen työvaiheiden välille vain muutama päivä, mutta se kasvoi viimeisen huoneen kohdalla useaksi viikoksi, koska työvaiheet etenivät eri vauhdilla mestalta toiselle. Tätä WIP:in muotoa voidaan epäillä olevan vähän myös tahtiaikataulussa, johtuen siitä, että työvaiheet eivät olleet suunniteltu kestäämään koko työvuoroa, mutta kuitenkin jokaiselle päivälle oli suunniteltu töitä joko hotellihuoneeseen tai hotellihuoneen kylpyhuoneeseen. Tahtisuunnitelman työkuormalaskennan mukainen teoreettinen käyttöaste työvaiheiden kestojen mukaan laskettuna oli 64 %. Tahtituotannon todettiin menevän ensimmäisen huoneen läpi kuudessa viikossa, mikä tarkoittaa 30 työpäivää. Käyttöasteen avulla laskettuna huone on siis teoreettisesti tyhjillään 10,78 työpäivää ensimmäisen vaunun aloituksen ja viimeisen vaunun lopetuksen välillä. Talon A1 vinoviiva-aikataulusta tunnistettiin useita jaksoja, jolloin viimeiseksi tehtävä huone odottaa jo kahden eri työvaiheen välissä yli kymmenen työpäivää, jonka vuoksi case-kohteen tahtisuunnitelmassa voidaan todeta olevan runsaasti vähemmän WIP:iä työvaiheiden välillä.

WIP yhden työvaiheen sisällä tarkoittaa taas WIP:iä, joka ilmenee, kun työvaiheelle on kerhallaan annettu käyttöön enemmän mestaa kuin työn suorittaminen vaatii (Faloughi et al. 2015). Tämä tarkoittaa liian suurta eräkokoja tuotannossa, mikä johtaa tarpeettomaan WIP:iin (Ward & McElwee 2007). Talon A2 tahtisuunnitelmasta eräkooksi on määriteltävissä toiselle tuotantojunalla yksi hotellihuoneen kylpyhuone ja toiselle tuotantojunalle yksi hotellihuone. Talon A1 vinoviiva-aikataulussa eräkokona on käytetty yhtä kerrosta, eli 6 – 19 hotellihuonetta, jolloin eräkokoo on huomattavasti suurempi kuin talon A2 tahtisuunnitelmassa. Tarkastelemalla taas kriittisesti vinoviiva-aikataulun laatua, on huomattavissa, että ensimmäisen ja toisen kerroksen työvaiheiden kestot on mitoitettu saman pituisiksi, vaikka

ensimmäisessä kerroksessa on 12 hotellihuonetta ja toisessa kerroksessa on 19 hotellihuonetta. Sacks et al. (2017) määrittelemät vaatimukset hyvän tuotteen virtauksen saavuttamiseen, eli sama työn kesto jokaiselle työryhmälle jokaisessa mestassa, stabiili työvauhti jokaiselle työryhmälle, pienet eräkoot ja minimoidut aikapuskurit toteutuvat siis talon A2 tahtisuunnitelmassa, mutta eivät talon A1 vinoviiva-aikataulussa.

Voidaan siis todeta, että vertailemalla case-kohteen tahtituotannolla tehtävän talon aikataulua ja perinteisin keinoin tehtävän talon vinoviiva-aikataulua, huomataan suunnitelmissa kirjallisuudestakin tunnistettu ero tahtituotannon pienemmästä määrästä tyhjän mestan muodossa olevaa hukkaa. Tahtisuunnitelmassa on vähemmän WIP:iä sekä yksittäisten työvaiheiden sisällä että eri työvaiheiden välissä, mikä ilmenee tuotannossa hukkana tuotteen virtauksessa, joka on hukkaa, jossa työ odottaa työntekijää. Tämä ei kuitenkaan johdu niinkään siitä, mitä kirjallisuuskatsauksen pohjalta tehdyssä hypoteesissa oletettiin, vaan siitä, että talon A1 vinoviiva-aikataulussa työvaiheet etenevät eri nopeuksilla ja erä koko on suurempi kuin tahtiaikataulussa. Tuotteen virtauksen heikentyminen ilmenee pidempänä läpimenoaikana. Huomattiin myös, että eri aikataulujen vertailuun tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti. Verrattaessa optimoitua tahtiaikataulua huonosti optimoituun vinoviiva-aikatauluun, voidaan saavuttaa merkittäviä tuloksia esimerkiksi läpimenoaikojen lyhennyksissä. Tässä tapauksessa tulos ei kuitenkaan johdu yksiselitteisesti toisen aikataulutuksen menetelmän yliver-taisuudesta, vaan vertailtavien aikataulujen laatu vaikuttaa tulokseen. Läpimenoaikoja voisikin siis olla parempi verrata laajuudeltaan ja ominaisuuksiltaan samankaltaisten, erilaisin aikataulutuksen menetelmin suunniteltujen, kohteiden toteutuneisiin läpimenoaikoihin.

Vertailemalla eri menetelmin tehtyjä aikataulusuunnitelmia aihetta voidaan tarkastella vain teoreettisella tasolla. Toisessa tapaustutkimuksessa mentiinkin toteutuksen tasolle videokuvaamalla ja havainnoimalla työmaalla. Tämän tapaustutkimuksen yhtenä tavoitteena oli selvittää tahtituotannon vaikutusta tuotteen virtaukseen mittaamalla mestojen käyttöasteita. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta muodostettuna hypoteesina oli, että mestojen keskimääräinen käyttöaste olisi yli 24 %. Kahden viikon mittausjakson ajalle hotellihuoneiden toteutuneiksi käyttöasteiksi saatiinkin 37 % aktiivisesta työpäivästä, eli työajasta, josta on poistettu ruokatauko ja kahvitauot. Käyttöaste laskettiin myös huomioiden vain yli viiden minuutin käynnit, jolloin se oli 31 %.

Vertailukelpoisena tuloksena aiemmin tehtyjen tutkimusten kanssa voidaan kuitenkin pitää arvoa 37 %, koska esimerkiksi Ward ja McElwee (2007) tai Salerto (2019) eivät ole mestan käyttöasteen laskennassa jättäneet huomiotta alle viiden minuutin käyntejä. Toisaalta empiirisessä osuudessa osoitettiin myös, että Zhao et al. (2019) oletus 10 minuutin rajasta arvoa tuottavalle työlle ei toimi ainakaan kaikkien työvaiheiden osalta, vaan arvoa tuottavaa työtä voidaan tehdä myös lyhyemmissä jaksoissa. Ward ja McElwee (2007) saivat hotellityömaan mestojen käyttöastetta tutkiessaan mestan keskimääräiseksi käyttöasteeksi 10 %. Tutkimuksen hotellityömaa toteutettiin ilman tahtituotantoa, joten työvaiheita ei oltu tahdistettu etenemään samalla vauhdilla mestalta toiselle ja erä koko oli suuri, 20 hotellihuonetta. Salerto (2019) mittasi diplomityössään mestan käyttöastetta tahtituotannolla toteutettavassa kohteessa, jossa oli viikon tahtiaika ja suuri tahtialue. Tuloksena hän sai tahtialueen keskimääräiseksi käyttöasteeksi 24 % työajasta. Eli perinteisellä tuotannolla on saavutettu 10 % mestojen keskimääräinen käyttöaste, tahtituotannolla, jossa on viikon tahtiaika ja suuri tahtialue on saavutettu 24 % mestojen keskimääräinen käyttöaste ja nyt tässä tapaustutkimuksessa päivän tahtiajalla ja pienellä, noin 20 m², tahtialueella toimineella tahtituotannolla saavutettiin 37 % keskimääräinen mestan käyttöaste.

Tapaustutkimuksessa mitattiin myös työpakettien, eli vaunujen, sisäisiä käyttöasteita. Työpakettin sisäinen mestan käyttöaste kertoo mestan käyttöasteen työpaketin aloituksen ja lopetuksen välillä. Vaunujen keskimääräiseksi sisäiseksi käyttöasteeksi saatiin 74 %. Tätä tulosta voidaan verrata Tetik et al. (2018) tulokseen mestan keskimääräisestä käyttöasteesta, joka oli 31,5 – 38,5 % riippuen käytetystä logistiikkaratkaisusta. Tetik et al. (2018) laskivat mestan käyttöasteen jakamalla mestalla vietetyn ajan päivän viimeisen arvoa tuottavan työn ajankohdan ja ensimmäisen arvoa tuottavan työn ajankohdan erotuksella. Tämä vastaa käytännössä tapaustutkimuksessa tehtyä vaunujen sisäisten käyttöasteiden tarkastelua. Tetik et al. (2018) tutkimuksessa ei ollut käytössä tahtituotantoa, joten arvojen vertailu antaa viitteitä siitä, että vaunujen sisäinen käyttöaste olisi huomattavasti suurempaa tämän tapaustutkimuksen kohteessa. Käytössä on kuitenkin vain yksi vertailukohde ja Tetik et al. (2018) tutkimuksessa ei avata, onko mestalla tehty monia eri töitä päivän aikana, jolloin mesta on voinut olla tyhjillään näiden työvaiheiden välillä, joten tähän vertailuun kannattaa suhtautua varauksella.

Vaikka mestojen keskimääräiseksi käyttöasteeksi saatiin verrokkeja korkeampi arvo, ei 37 % keskimääräinen käyttöaste vaikuta kuitenkaan erityisen korkealta. Vaunujen sisäinen mestojen keskimääräinen käyttöaste on kuitenkin ollut 74 %, mikä viittaa siihen, että mestat ovat olleet eniten tyhjillään vaunujen välillä. Pohtiessa syitä tähän tyhjillään oloon, selittyy se osittain suunniteltujen ja toteutuneiden kumulatiivisten tuntien vertailulla, jossa huomattiin suunniteltujen kumulatiivisten tuntien olleen molemmissa huoneissa suuremmat kuin toteutuneet kumulatiiviset tunnit. Tämä viestii siitä, että työvaiheet on arvioitu kestävänsä todellista pidempään. Vaunukohtaisessa vertailussa kuitenkin huomattiin, että kaikkia työvaiheita ei oltu systemaattisesti mitoitettu liian pitkiksi, vaan osan oli arvioitu kestävän liian kauan ja osan liian vähän. Suunniteltujen ja toteutuneiden kumulatiivisten tuntien välillä on kuitenkin vain muutamien tuntien eroja, joten se ei kokonaisuudessaan riitä selittämään tätä havaintoa.

Tarkastellessa tahtisuunnitelman työkuormalaskentaa, on huomattavissa, että eri työvaiheiden välissä on mainittuna edellisen työvaiheen kuivuminen. Kuivumisaika oli siis useimmiten case-kohteen tahtisuunnittelussa huomioitu niin, että edellinen työvaihe kuivuu niin sanotusti yön yli ja on seuraavan työvuoron, eli tahdin, alussa seuraavan vaunun käytettävissä. Tahtisuunnittelussa oli ainoastaan yksi yli 12 tunnin kuivuminen, jolle oli tehty oma vaununsa kuivumisesta varten. Systemaattisessa havainnoinnissa kuitenkin havaittiin kymmenen kertaa edellisen työvaiheen kuivumisen estäneen suunnitellun vaunun työskentelyä huoneessa. Tästä voidaan päätellä, että edellinen työvaihe on tehty myöhässä ja se ei ole ehtinyt kuivua yön yli. Tätä päätelmää tukee myös havainnoinnit palaverissa, joissa työvaiheiden todettiin olevan osittain jäljessä. Kun työvaiheesta seuraa kuivumisaika, ei seuraavaa työvaihetta voida aloittaa heti edellisen päätyttyä. Tästä on mahdollisesti syntynyt Seppänen (2014) kuvailemia kasautuneita viiveitä tuotantoon, koska aikataulua ei ole voitu ottaa kiinni esimerkiksi tekemällä kahta peräkkäistä vaunua saman päivän aikana. Kuivumisajoilla on kuitenkin vaikutusta mestan käyttöasteeseen ja ne aiheuttavat mestan tyhjillään olo työvaiheiden välillä, mikä osaltaan selittää myös alhaista mestojen keskimääräistä käyttöastetta.

Korkeampaa mestojen käyttöastetta on tahtisuunnittelussa rajoittanut myös erikoistuneet aliurakoitsijat. Forsberg ja Saukkoriipi (2007) onkin esittäneet, että erikoistuneet aliurakoitsijat ovat tehneet rakentamisen tuotantoprosessista joustamattoman. Myös Salem et al. (2018) ovat maininneet, että kun aliurakoitsijat ovat erikoistuneet pitkälle ammattilajeihinsa, tulee

työkuormien tasaamisesta huomattavasti hankalampaa. Binninger et al. (2016) taas mainitsevat, että nopeat työvaiheet, tulee tahtituotannossa joko pilkkoa epäjatkokuvaksi tehtäväksi tai yhdistää tehtäväksi muiden työvaiheiden yhteydessä. Case-kohteen tahtisuunnitelma oli suunniteltu niin, että yhdessä vaunussa on vain yhden aliurakoitsijan töitä. Kun aliurakoitsijoilla on yksittäisiä, nopeita työvaiheita muiden aliurakoitsijoiden töiden välissä, aiheuttaa tämä mestan tyhjillään oloa eri työvaiheiden välissä, mikä ilmenee heikompana mestan käyttöasteena. Mikäli kaikki työntekijät voisivat tehdä jokaista työsuoritetta ja kuivumisaikoja ei tarvitsisi huomioida, voitaisiin mahdollisesti saavuttaa optimaalinen mestojen käyttöaste. Tämä ei kuitenkaan rakentamisen viitekehityksessä ole realistinen ajatus. Oletettavasti mestan käyttöastetta voitaisiin kuitenkin nostaa ja sitä kautta tuotteen virtausta parantaa hankkimalla aliurakoitsijoita, jotka pystyvät tekemään useamman perättäisen työsuorituksen.

Toisessa tapaustutkimuksessa pyrittiin paneutumaan myös tahtituotannon vaikutuksiin työn virtauksessa. Kirjallisuuden pohjalta muodostettuna hypoteesina pidettiin sitä, että tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen parantavasti poistamalla siitä hukkaa. Ehdoksi tälle kuitenkin asetettiin, että työvaiheille on määritetty tarpeeksi paljon selkeää varamestaa ja tahtiohjausta toteutetaan tarpeeksi tiheästi ja laadukkaasti. Pohtimalla työn virtauksessa olevaa hukkaa vaunujen sisäisten käyttöasteiden kautta, päästään käsiksi aikaan, jonka työntekijä on käyttänyt arvoa tuottamattomiin tehtäviin työvaiheen sisällä. Kuten Zhao et al. (2019) on esittänyt, arvoa tuottavan työn vaatimuksena voidaan pitää sitä, että työntekijä on läsnä mestalla. Vaunujen sisäisen keskiarvollisen mestan käyttöasteen ollessa 74 %, voidaan työvaiheen sisällä olleen arvoa tuottamattoman ajan olleen ainakin 26 % ajasta, jolloin työntekijä ei ollut mestalla. Todellisuudessa tämä arvo on vielä suurempi, koska mestalla oltua aikaa ei ole tässä tapaustutkimuksessa eritelty arvoa tuottavaan tai arvo tuottamattomaan aikaan.

Yllättävänä havaintona videoanalyysistä ilmeni, että huoneissa oli huomattava määrä käyn-tejä mittausjakson aikana. Videomateriaalista havainnoidut 1590 käyntiä, eli keskiarvollisesti 79,5 käyntiä huoneessa päivittäin viestii siitä, että tuotannossa oli runsaasti hukkaa. Näistä käynneistä monet olivat todella lyhyitä pistäytymisiä mestalla ja alle viiden minuutin käyn-tejä näistä käynneistä olikin yhteensä 1428 kappaletta. Formoso et al. (1999) määrittel-lyn mukaan liike on yksi hukan muoto, eli esimerkiksi työntekijöiden tarpeeton ja tehoton liike nähdään hukkana. Eli, mikäli liikkeen muodossa olevaa hukkaa ei tuotannossa työntekijöiden osalta olisi, tulisi päivän aikana käyn-tejä olla noin neljä per huone, olettaen että huoneessa työskentelee vain yksi työntekijä kerrallaan ja hän poistuu kaikilla tauoilla huoneesta. Yksittäiselle mestalle tapahtuneiden käyntien määrää tarkastelevia tutkimuksia ei ole kirjallisuudesta tunnistettu, joten tässä tutkimuksessa havaitun käyntien lukumäärän vertailu aiempiin tutkimuksiin ei ole mahdollista, mutta siitä huolimatta se vaikuttaa poikkeavan suurelta.

Mestalla vietetyn ajan kautta on mahdollista saada viitteitä työn virtauksessa ilmenevästä hukasta. Zhao et al. (2019) saivat työntekijöiden yli viiden minuutin mestalla vietetyn ajan osuudeksi 29 – 42 % mitatusta ajasta. Case-kohteessa mitatuissa huoneissa yli viiden minuutin läsnäolot muodostavat 31 % osuuden koko mitatusta ajasta. Toisaalta Zhao et al. (2019) tutkimus on kattanut kaikki työmaan mestat, eikä tämän työn tapaustutkimuksessa mitattu kuin kahta tahtialuetta, jolloin ei voida päätellä työntekijöiden yli viiden minuutin läsnäoloja kaikilla mestoilla, koska mittaus rajoittuu vain kahteen mestaan.

Kirjallisuuskatsauksen pohjalta yhtenä tulkinnallisena päätelmänä pidettiin, sitä että tiheään tapahtuvalla tahtiohjauksella voitaisiin vähentää työn virtauksessa ilmenevää hukkaa vähentämällä tuotannossa ilmenevää vaihtelua. Työmaalla suoritettussa havainnoinnissa huomattiin, että tahtiohjausta ei ollut lähes lainkaan case-kohteessa. Tämän havainnon pohjalta voitaisiinkin siis olettaa, että tuotannossa olisi paljon vaihtelua ja työn virtauksessa ilmenevää hukkaa.

Vaihtelua tarkasteltiin vertailemalla vaunukohtaisia työvaiheiden sisäisiä käyttöasteita ja vaunujen kestoja, päivittäisten käyntien määriä huoneittain, päivittäisten käyntien keskipituuksia ja pituuksien keskihajontaa huoneittain sekä päivän aikana huoneessa käyneiden eri aliurakoitsijoiden määriä. Vaunujen sisäisiä käyttöasteita ja niiden kestoja vertaillen havaittiin muutamia suurempia poikkeamia, mutta vaihtelu tuntui olevan kuitenkin maltillista. Kun päivittäisiä käyntejä havainnoitiin eri huoneissa, huomattiin suurempaa vaihtelua. Päivittäisten käyntien määrät vaihtelivat suurimman arvon olleen 133 käyntiä ja pienimmän 36 käyntiä. Päivittäisten käyntien lukumäärän keskihajonnaksi saatiin 22,7 käyntiä. Myös käyntien keskipituuksissa, pituuksien keskihajonnassa ja mestalla käyneiden työntekijöiden lukumäärissä oli paljon vaihtelua päivittäin.

Kun vaunukohtaisessa tarkastelussa ei vaihtelua ollut niin paljon havaittavissa, voidaan päätellä, että työn virtauksessa oli vähemmän hukkaa silloin, kun työntekijälle oli selvää mitä hänen tulee tehdä ja missä, eli silloin kun työntekijä on aloittanut tietyn vaunun työt mestalla. Brodetskaia ja Sacks (2007) onkin havainnut, että työn virtauksen suuresta vaihtelusta, epäselvästä tilannekuvasta ja lyhyellä aikavälillä tapahtuvien tuotannonohjauskeinojen puutteesta johtuen työntekijät joutuivat keskenään neuvottelemaan millä mestalla kukin työskentelee. Tämä johti siihen, että työntekijät liikkuvat ympäri työmaata etsien itselleen seuraavaa mestaa. Kun työntekijät joutuivat etsimään itselleen uutta mestaa, syntyi tuotantoon enemmän vaihtelua. (Brodetskaia & Sacks 2007.) Seppänen (2014) on esittänyt, että tahtituotanto tarvitsee riittävästi ennalta määritettyä varamestaa toimiakseen tehokkaasti. Kun tahtiohjausta suoritettiin puutteellisesti ja varamestoja ei oltu määritetty, voidaan olettaa, että työntekijät ovat joutuneet etsimään itselleen vapaata mestaa ja varmistelemaan seuraavalle mestalle pääsyään kiertelemällä eri mestoilla. Case-kohteessa havaitun suuren määrän liikkettua voidaankin siis päätellä johtuvan näistä puutteista, jotka juontavat juurensa sekä laiminlyötyyn tahtiohjaukseen että määrittelemättömiin varamestoihin.

8.2 Tutkimuksen tieteellisen kontribuution arviointi

Kirjallisuuskatsauksessa huomattiin, että hukkaa mittaavia tutkimuksia on tehty, mutta tyhjän mestan muodossa olevaa hukkaa mitanneita tutkimuksia löydettiin vain kaksi (Ward & McElwee 2007) (Tetik et al. 2018). Tahtituotannolla toteutettavilla työmailla ilmenevää hukkaa ei ole juurikaan tutkittu lukuun ottamatta Salerron (2019) diplomityötä, jossa tutkittiin tyhjän mestan muodossa ilmenevää hukkaa tahtituotannossa, jossa on suuri tahtialue ja pitkä tahtiaika. Tässä diplomityössä tutkittiin tyhjän mestan muodossa ilmenevää hukkaa tahtituotannossa, jossa oli lyhyt tahtiaika ja pieni tahtialue. On todettu, että mitä lyhyempi tahtiaika systeemillä on sitä tehokkaammin se voi toimia (Haghsheno et al. 2016). Tässä diplomityössä esitettiin, että mestan käyttöaste on suurempi, kun tahtituotannossa on lyhyempi tahtiaika. Tätä löydöstä voidaan pitää tutkimuksen yhtenä merkittävimmistä tieteellisistä kontribuutioista, koska tutkimuksessa tuotettiin uutta tietoa mittaamalla hukkaa lyhyellä tahtiajalla ja pienellä tahtialueella toteutetussa tahtituotannossa. Verrokkituloksia on kuitenkin niin vähän, että asiaan tulee palata tulevaisuudessa, jotta aiheesta voidaan muodostaa luotettava käsitys.

Yhtenä tieteellisenä kontribuutiona on myös se, että Zhao et al. (2019) olettaa kymmenen minuutin raja-arvoa arvoa tuottavalle työlle ei voida pitää ainakaan kaikkien työvaiheiden osalta luotettavana. Tämä todistettiin työn empiirisessä osuudessa toteutetussa videoanalyysissä, jossa arvoa tuottavaa työtä havaittiin tehtävän myös lyhyemmissä jaksoissa. Videoanalyysin perusteella vaikuttaisi siltä, että edes viiden minuutin raja-arvo ei toimi raja-arvona arvoa tuottavalle työlle, vaan arvoa tuottavaa työtä tehtiin lyhyissä, jopa noin kahden minuutin jaksoissa. Kahden minuutin ollessa suhteellisen lyhyt ajanjakso, voi se helposti olla myös kartoittava käynti mestalla, jolloin arvoa tuottavaa työtä ei tehdä. Tästä johtuen ajallisen raja-arvon määrittäminen arvoa tuottavaa työtä sisältävälle käynnille on haastavaa ja ehkä jopa mahdotonta.

Uutta tietoa tuotettiin myös havaitsemalla videokameroilla kerätystä datasta huomattava määrä tarpeetonta liikettä kuvatuissa huoneissa. Zhao et al. (2019) ovat esittäneet oletuksen, että työmaalla ilmenevä tarpeeton liike on tuotannon virtauksissa olevien häiriöiden ilmentymä ja tätä oletusta on luvattu validoida tulevissa tutkimuksissa. Tässä diplomityössä kuitenkin havaittiin, että vaikka toinen tuotannon virtauksista, eli tuotteen virtaus oli vertailukohteita parempi, oli mittauksessa tarpeetonta liikehdintää todella paljon. Tämä havainto antaa viitteitä siitä, että tarpeettomana liikkeenä ilmenevät häiriöt liittyvät enemmänkin työn virtauksessa sijaitseviin häiriöihin, kuin molemmissa tuotannon virtauksissa, eli työn ja tuotteen virtauksissa sijaitseviin häiriöihin. Tätä löydöstä voidaan pitää myös tieteellisen kontribuution kannalta merkittävänä.

8.3 Tutkimuksen kontribuutio alan yritysten näkökulmasta

Tutkimuksen tulokset antavat rakennusalan toimiville yrityksille todisteita siitä, että tahtituotannolla saadaan vähennettyä tyhjän tilan muodossa olevaa hukkaa, mikä parantaa tuotteen virtausta ja näin ollen lyhentää koko projektin läpimenoaikaa. Heinonen ja Seppänen (2016) esittivät kuitenkin, että paine läpimenoaikojen radikaaliseen lyhentämiseen tuli hytirtiremonteissa tilaajalta. Tavanomaisessa rakennushankkeessa pääurakoitsijalla ei välttämättä kuitenkaan ole painetta lyhentää läpimenoaikoja, jolloin ylimääräistä aikaa käytetään tilapuskureina työvaiheiden välissä. Tällä menettelyllä yritetään pienentää aikatauluriskiä ja tyhjillään olevat tilat nähdään toivottuna ilmiönä, tilapuskureina. On kuitenkin ilmeistä, että lyhentämällä rakennusaikoja rakennukset saataisiin nopeammin tuottamaan rahallisesti ja sekä tilaajan, että urakoitsijoiden hankkeeseen sidotut pääomat saataisiin nopeammin käyttöön seuraaviin projekteihin. Tämän vuoksi rakennusajan lyhentäminen on oleellinen, pohdinnan arvoinen asia, mutta muutos kohti tätä parannusta pitää lähteä hankkeen tilaajan ja pääurakoitsijan yhteisestä tavoitteesta.

Tutkimuksessa havaittiin myös, että mikäli tahtituotantoa lähdetään toteuttamaan, tulee tämän olla yhteinen tavoite koko hankkeen organisaatiolle. Case-kohteessa suunnittelu ja rakentaminen toteutettiin rinnan hankkeen urakamuodon hengen mukaisesti. Suunnitteluai-kataulua ei oltu yhdistetty tahtiaikatauluun, mikä aiheutti viivästyksiä tahtituotannon aloittamisessa. Suunnitteluai-kataulun, hankinta-ai-kataulun ja tahtiaikataulun tulee kaikkien olla yhteydessä toisiinsa, jotta tahtituotantoa voidaan toteuttaa onnistuneesti. Case-kohteen suunnitelmien viivästykset johtivat hankintojen tekemisen viivästymiseen, mikä johti siihen, että tahtituotannon aloitusta jouduttiin siirtämään, koska tahtituotantoon kuuluvia aliorakoitsijoita ei oltu onnistuttu hankkimaan puuttuvien suunnitelmien vuoksi. Toisaalta tahtituotannon aloittamisen siirtämiseen vaikutti myös tahtituotantoa ennen tehtävien työvaiheiden myöhästyminen. Nämä työvaiheet olivat aikataulutettu erilliseen aikatauluun, mutta niiden etenemistä ei seurattu, mikä johti siihen, että töiden aikataulu ei pitänyt. Tällöin töille oli

olemassa enää nimellinen aikataulu, joka ei pitänyt paikkaansa, eli käytännössä sillä ei ollut mitään painoarvoa. Tahtituotantoa edeltävät työt myöhästyivät, mutta tahtituotanto pakotettiin alkamaan, vaikka osa tahtia edeltävistä töistä oli tekemättä. Tämä aiheuttaa haasteita ja urakoitsijoille niin sanottua ”hyppimistä”, joka ilmenee työmaalla esimerkiksi tarpeettomana liikkeenä.

Mestakameroiden avulla nauhoitetusta materiaalista huomattiinkin, että tarpeetonta liikettä oli työmaalla runsaasti. Tämän pääteltiin johtuvan edellisessä kappaleessa mainituista ongelmista sekä laiminlyödyistä tahtiohjauksesta ja puuttuneista varamestoista. Tahtiohjauksen laiminlyömisestä aiheutuneet ongelmat viestivät alan yrityksille tahtiohjauksen tärkeydestä tahtituotannossa. Kun tuotteen virtausta parannetaan poistamalla tyhjän tilan muodossa olevaa hukkaa, tulee työn virtauksesta alttiimpi häiriöille. Tahtituotannossa tämä on ratkaistu normaalia tiheämmällä aikataulun ohjauksella ja ennalta määritetyillä varamestoilla. Mikäli nämä tahtituotannon osa-alueet sivuutetaan, johtaa se huonontuneeseen työn virtaukseen, joka voi johtaa aliurakoitsijoiden tyytymättömyyteen ja mahdollisiin maksuvaateisiin.

Joustamattoman tuotantoprosessin kuvailtiin aiemmin olevan liian erikoistuneiden aliurakoitsijoiden ja tarkemmin ottaen niistä johtuvien eri osapuolien eriävien tavoitteiden syytä. On ilmeistä, että mikäli tahtituotantoa tehdessä aliurakoitsijoiden halutaan etenevän mestasta toiseen tasaisella nopeudella, tehden työt mahdollisuuksien mukaan kerralla valmiiksi yhdessä mestassa, tulee urakkasopimusten myös kannustaa heitä toimimaan tällä tavalla. Mikäli jokaisen urakoitsijan on kannattavinta tehdä työsuoritteensa niin nopeasti kuin mahdollista, johtaa se projektin osaoptimointiin, joka ei ole projektin kokonaisuuden kannalta paras vaihtoehto. Jotta aliurakoitsijoiden ei olisi kannattavinta tehdä työsuoritettaan niin nopeasti kuin mahdollista, tulisi urakkasopimusten maksuperusteet olla sidottuna tahtiaikatauluun. Tämä yhdessä tahtiohjauksen, ennalta määritetyn varamestan ja tahdin aloitusedellytysten täyttymisen kanssa antaa avaimet onnistuneeseen tahtituotannon toteuttamiseen ja siihen, että kaikki projektin osapuolet pystyvät yhdessä kehittämään prosessia ja vähentämään siinä olevaa hukkaa, tehden projektista kaikille kannattavampaa.

8.4 Tutkimuksen luotettavuuden arviointi

Tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa voidaan arvioida tutkimuksen reliaabelisuutta sekä validiutta. Tutkimuksen reliaabeliudella tarkoitetaan mittaustulosten toistettavuutta, kun taas validiudella tarkoitetaan mittarin tai tutkimusmenetelmän kykyä mitata juuri sitä, mitä halutaankin mitata (Hirsjärvi et al. 2000). Tutkimusmenetelmänä ollut tapaustutkimus tuo osittaisia rajoitteita tutkimuksen reliaabelisuuteen. Tapaustutkimuksissa mitattujen tapausten ollessa ainutkertaisia, toistumattomia tapauksia, on tutkimustulosten toistettavuus vastaavissa mittauksissa hyvin epätodennäköistä, koska tutkimusta ei sellaisenaan voida toistaa käyttämällä samaa tapausta. Toisaalta Vilkan (2007) mukaan arvioidessa tutkimuksen reliabiliteettia tarkkaillaan ennen kaikkea mittaukseen liittyviä asioita ja tarkkuutta tutkimuksen toteutuksessa. Tutkimuksen tarkkuutta voidaan arvioida arvioimalla satunnaisvirheen mahdollisuutta.

Yksittäisen satunnaisvirheen mahdollisuus mestakameramittauksessa on suuri, johtuen laajasta käsitelystä materiaalista. Videomateriaalin käsittely, eli videoiden tallentaminen, videolta havainnointi ja havaintojen kirjaaminen tapahtuivat kaikki manuaalisesti diplomi-työntekijän toimesta, jolloin satunnaisvirheen mahdollisuus kasvaa esimerkiksi näppäilyvirheen johdosta. Toisaalta videomateriaalissa oli muutamia epäselviä tilanteita. Yhdellä kerralla kameran liiketunnistin ei ollut reagoinut työntekijän saapumiseen huoneeseen ja toisella

kerralla videolla ei näy työntekijän poistumista huoneesta. Toisen huoneen eteisen laatoituksen lopetushetkeä ei voitu määritellä tarkasti, koska kameran asettelun vuoksi näkyvyys hotellihuoneen oviaukkoon oli rajoittunut. Kamera myös käännettiin kerran työntekijän toimesta hetkellisesti, jolloin näkyvyys videolla oli rajattu. Näissä epäselvissä tilanteissa tilanne kuitenkin tulkittiin niin, että työntekijä ei ollut huoneessa ja analysointiin otettiin mukaan ainoastaan aika, jolloin voitiin olla varmoja, että työntekijä on mestalla. Näiden yksittäistapausten tiedetään vaikuttaneen tuloksiin, mutta virheen toistuvuuden ollessa niin pieni, neljä käyntiä 1590:stä käynnistä, arvioidaan vaikutuksen olevan olematon.

Tutkimuksen validiuden tarkoittaessa tutkimuksen kykyä mitata juuri sitä, mitä halutaankin mitata, voidaan tehtyä tutkimusta pitää validina. Tutkimus ei ole riippuvainen esimerkiksi siitä, että ymmärtävätkö haastateltavat tai kyselyyn osallistujat kysytyt kysymykset, koska tutkimuksen aineiston keruuseen ei käytetty haastatteluita tai kyselyitä. Kuten Zhao et al. (2019) ovat todenneet, että kyselyin ja haastatteluin toteutetut, hukka mittaavat, tutkimukset eivät ole tuloksiltaan kovin luotettavia, koska työntekijät eivät aina itse tunnista mitkä työt ovat arvoa tuottavia ja mitkä eivät. Tästä johtuen tämän diplomityön tutkimusmenetelmää voidaan pitää validimpana, kuin vastaavaa aihetta tutkivien kysely- tai haastattelututkimusten tutkimusmenetelmää.

Kokonaisuudessaan huolimatta siitä, että tutkimus käsitteli ainutkertaisia tapahtumia ja videomateriaalin käsittelyssä tapahtuneen yksittäisten satunnaisvirheiden mahdollisuus on olemassa, voidaan tutkimusta pitää reliaabeliuden ja validiuden kannalta luotettavana kokonaisuutena, joka tarjoaa ainutkertaisten tapahtumien kautta tuloksia, jotka ovat vertailukelpoisia muihin vastaaviin tapauksiin.

9 Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda käsitys tahtituotannon potentiaalista hukan vähentäjänä rakentamisen tuotannossa. Tähän tavoitteeseen pyrittiin pääsemään vastaamalla kolmeen ennalta määritettyyn tutkimuskysymykseen. Alle on koottu vastaukset tutkimuskysymyksiin tutkimuksen tulosten sekä pohdinnan pohjalta.

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen: ***Miten tahtituotannolla voidaan vähentää hukkaa työmaalla?*** hypoteesiksi muodostui kirjallisuuskatsauksen pohjalta se, että tahtituotannolla voidaan vähentää tyhjän mestan muodossa olevaa hukkaa, käyttämällä kapasiteettipuskureita kiinteiden aikapuskureiden sijaan. Tutkimuksen tulosten perusteella aikapuskureiden käyttö osoittautui kuitenkin pieneksi tekijäksi empiirisen osuuden aikataulujen vertailussa. Vinoviiva-aikataulussa oli paljon tyhjän mestan muodossa olevaa hukkaa johtuen tahdistamattomista työvaiheista ja suuresta eräkoosta. Tämän tutkimuksen perusteella vastaus tähän tutkimuskysymykseen on se, että tahtituotannolla voidaan vähentää työmaalla tyhjän mestan muodossa ilmenevää hukkaa tahdistamalla työvaiheet etenemään samalla nopeudella mestalta toiselle ja käyttämällä pienempää eräkokoa tuotannossa. Nämä samat asiat voitaisiin toteuttaa myös optimoidulla LBMS-aikataululla, joten johtuen case-kohteen huomosti optimoidusta vinoviiva-aikataulusta tähän kysymykseen ei onnistuttu vastaamaan aukottomasti ja todellinen ero optimoidun vinoviiva-aikataulun ja optimoidun tahtiaikataulun hukkien välillä jäi empiirisesti tutkimatta.

Hypoteesina toiseen tutkimuskysymykseen: ***Miten tahtituotanto vaikuttaa tuotteen virtaukseen?*** oli, että tuotteen virtaus paranee korkeamman mestan käyttöasteen kautta käyttämällä tahtituotantoa ja oletuksena oli, että mestan käyttöaste olisi case-kohteessa yli 24 %. Tulosten perusteella vastauksena tutkimuskysymykseen saatiin, että tahtituotanto vaikuttaa positiivisesti tuotteen virtaukseen nostamalla mestan käyttöastetta. Mestojen keskimääräiseksi käyttöasteeksi mitattu 37 % viestii siitä, että mitä lyhyempi tahtiaika, eli pienempi eräkokoa, tahtituotannossa on, sitä parempi tuotteen virtaus on mahdollista saavuttaa.

Kolmannen tutkimuskysymyksen: ***Miten tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen?*** hypoteesina oli, että tahtituotanto parantaa myös työn virtausta. Tämän oletettiin tapahtuvan minimoimalla tuotannossa esiintyvää vaihtelua tiheään tapahtuvan tahtiohjauksen ja etukäteen määriteltujen selkeiden varamestojen avulla. Tutkimuksen tuloksissa kuitenkin ilmeni, että työn virtauksessa oli runsaasti hukkaa tarpeettoman liikkeen muodossa. Päämassan tarpeettomasta liikkeestä arvioitiin olevan eri työvaiheiden aloitusten välillä ja mestoille suorituissa käynneissä oli havaittavissa paljon vaihtelua. Case-kohteessa tahtiohjaus oli laiminlyöty ja vaunuille ei oltu määritetty varamestoja. Vastauksena tutkimuskysymykseen voidaan todeta, että mikäli tahtiohjausta ei suoriteta tarpeeksi tiheästi, eikä työvaiheille ole määritetty riittävästi varamestaa, tahtituotanto heikentää työn virtausta, mikä ilmenee työmaalla suurena määränä tarpeetonta liikettä.

Tämän tutkimuksen perusteella tahtituotannon potentiaali hukan vähentäjänä painottuu siis tuotteen virtaukseen. Toinen tuotannon virtauksista, eli työn virtaus, näyttäisi tahtituotannossa olevan alttiimpi häiriöille ja mikäli tahtituotannon potentiaalia tuotannon hukkien vähentäjänä halutaan rakennustyömaalla hyödyntää kokonaisvaltaisesti, tulee työn virtauksesta pyrkiä poistamaan vaihtelua erilaisin keinoin, kuten tiheään tapahtuvalla tahtiohjauksella.

Hukkaa tahtituotannossa mittaavia tutkimuksia ei ole juurikaan tehty, joten jatkotutkimusaiheita liittyen samankaltaisten tutkimusten jatkamiseen on helppoa tämän diplomityön perusteella suositella. Eri hukkatyyppien määrää mittaavia tutkimuksia, varsinkin tahtituotantoa noudattavalla työmaalla tulisi olla enemmän, jotta vertaaminen aiempiin tutkimustuloksiin olisi mahdollista. Tutkimuksen perusteella tunnistettiin kuitenkin kolme selkeää jatkotutkimusaihetta:

- 1. Tyhjän mestan muodossa olevan hukan mittaaminen:** Tutkimuksessa huomattiin, että tyhjän mestan muodossa olevaa hukkaa mitanneita tutkimuksia löytyi kirjallisuuskatsauksen perusteella vain kolme kappaletta. Kahdessa näistä tutkimuksessa tutkittiin työmaita, joissa ei ollut käytössä tahtituotantoa. Jotta hukan määrästä voidaan muodostaa realistinen tilannekuva, tulee sitä mitata laajemmin. Näin ollen jatkotutkimusaiheena esitetäänkin tutkittavaksi lisää tyhjän mestan muodossa olevaa hukan määrää realistisen tilannekuvan muodostamiseksi. Tahtiaikataulun potentiaalia hukan vähentäjänä on luotettavampaa arvioida, kun vertailukohteita on enemmän olemassa.
- 2. Tarpeettoman liikkeen muodossa olevan hukan mittaaminen tahtituotannossa:** Tutkimuksessa havaittiin vertailukohteita paremmasta mestan käyttöasteesta huolimatta suuri määrä tarpeetonta liikettä. Jotta mahdollinen yhteys parantuneen tuotteen virtauksen ja lisääntyneen tarpeettoman liikkumisen välille saataisiin validoitua tai osoitettua vääräksi, tarvittaisiin aiheesta lisää tutkimusta eri case-kohteisiin pohjautuen.
- 3. Työn virtauksessa ilmenevän vaihtelun mittaaminen tahtituotannossa:** Tutkimuksessa havaittiin, että tahtiohjauksen ja varamestan puuttuessa työn virtauksessa oli runsas määrä vaihtelua, joka ilmeni vaihteluna päivittäisissä käynneissä mes-toilla. Olisikin siis mielenkiintoista tutkia, kuinka tahtituotanto vaikuttaa työn virtaukseen muissa tahtituotantoa hyödyntävissä hankkeissa ja mikä tahtiohjauksen vaikutus on työn virtauksessa ilmenevään vaihteluun.

Lähdeluettelo

- Aslesen, S., Reff, S. & Stordal, E. (2019). How Long Does it take to Build an Apartment?. In: *Proc. 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, 1309-1320.
- Bajjou, M. & Chafi, A. (2018). The potential effectiveness of lean construction principles in reducing construction process waste: an input-output model. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 12(4), 4141-4160.
- Ballard, G. (1999). Improving work flow reliability. In *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 275 - 286.
- Ballard, G. & Howell, G. (1994). Implementing lean construction: stabilizing work flow. *Lean construction*, 101 - 110.
- Ballard, G. & Howell, G. (1998). Shielding production: essential step in production control. *Journal of Construction Engineering and management*, 124(1), 11 - 17.
- Ballard, G. & Howell, G. (2003). Competing construction management paradigms. In *Construction Research Congress: Wind of Change: Integration and Innovation*, 1 - 8.
- Bertelsen, S., Koskela, L., Henrich, G. & Rooke, J. (2006). Critical flow - Towards a construction flow theory. *Understanding and Managing the Construction Process: Theory and Practice - 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-14*, 31-40.
- Binninger, M., Dlouhy, J. & Haghsheno, S. (2017). Technical takt planning and takt control in construction. In *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Heraklion, Greece*, 605 - 612.
- Binninger, M., Dlouhy, J., Müller, M., Schattmann, M. & Haghsheno, S. (2018). Short Takt time in construction—a practical study. In *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-26*, 1133-1143.
- Binninger, M., Dlouhy, J., Oprach, S. & Haghsheno, S. (2016). Methods for production leveling - Transfer from lean production to lean construction. *IGLC 2016 - 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 53-62.
- Binninger, M., Dlouhy, J., Steuer, D. & Haghsheno, S. (2017). Adjustment Mechanisms for Demand-oriented Optimisation in Takt Planning and Takt Control. In: *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion, Greece, 9-12 Jul 2017*, 613-620.
- Brodetskaia, I. & Sacks, R. (2007). Understanding flow and micro-variability in construction: theory and practice. *Proceedings IGLC-15, July 2007, Michigan, USA*, 488 – 497.

- Brodetskaia, I., Sacks, R. & Shapira, A. (2011). A workflow model for systems and interior finishing works in building construction. *Construction Management and Economics*, 29(12), 1209-1227.
- Christian, J. & Hachey, D. (1995). Effects of Delay Times on Production Rates.. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121, 20-26.
- De Bortoli Saggin, A., Mota, T., Brito, F. & Mourão, C. (2017). Standardized work: Practical examples in a Brazilian construction company. *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2017; Hersonissos, Crete; Greece; 9 July 2017 through 12 July 2017*, 713-720.
- Dlouhy, J., Binninger, M., Oprach, S. & Haghsheno, S. (2016). Three-level method of Takt planning and Takt control—A new approach for designing production systems in construction. *International Group for Lean Construction, Boston, MA, USA*, 13 – 22.
- Evinger, J., Mouflard, C. & Seppänen, O. (2013). Productivity effects of starting as early as possible in hospital construction. In *Proceedings of the 21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Fortaleza, Brazil*, 626 – 635.
- Ezzeddine, A., Shehab, L., Hamzeh, F. & Lucko, G. (2019). Singularity Functions to Enhance Monitoring in the Last Planner System. In: *Proc. 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Pasquire C. and Hamzeh F.R. (ed.), Dublin, Ireland, 287 – 298.
- Faloughi, M., Linnik, M., Murphy, D. & Frandson, A. (2015). Wip design in a construction project using takt time planning. *Proceedings of IGLC 23 - 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Global Knowledge - Global Solutions*, 163-172.
- Farag, M.A.M. (2014). A bridge between increasing reliability and reducing variability in construction work flow: A fuzzy-based sizing buffer model. *Journal of Advanced Management Science Vol*, 2(4), 287 - 294.
- Fiallo, M. & Howell, G. (2012). Using production system design and takt time to improve project performance.. In *Proceedings of the 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC 20)*, San Diego, CA, USA.
- Formoso, C., Isatto, E. & Hirota, E. (1999). Method for waste control in the building industry.. *Proceedings IGLC*, 7, 325-334.
- Forsberg, A. & Saukkoriipi, L. (2007). Measurement of waste and productivity in relation to lean thinking. In *Annual Conference of the International Group for Lean Construction: 18/07/2007-20/07/2007*, 67-76.
- Frandson, A., Berghede, K. & Tommelein, I.D. (2013). Takt time planning for construction of exterior cladding. In *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Fortaleza, Brazil*, 527 - 536.

- Frandsen, A. G. & Tommelein, I. D. (2014). Automatic generation of a daily space schedule. *IGLC-22 Proceedings, Oslo, Norway*, 617-626.
- Frandsen, A.G. & Tommelein, I.D. (2016). Takt time planning of interiors on a Pre-Cast hospital project. In *Proceedings of the 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Boston, MA, USA*, 143 – 152.
- Frandsen, A., Seppänen, O. & Tommelein, I. (2015). Comparison between location based management and takt time planning. *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Perth, IGLC*, 3-12.
- Gouett, M.C., Haas, C.T., Goodrum, P.M. & Caldas, C.H. (2011). Activity analysis for direct-work rate improvement in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(12), 1117 - 1124.
- Haghsheno, S., Binninger, M., Dlouhy, J. & Sterlike, S. (2016). History and theoretical foundations of takt planning and takt control. In *Proceedings of the 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC 24), Boston, MA, USA*, 53 - 62.
- Heinonen, A. & Seppänen, O. (2016). Takt time planning in cruise ship cabin refurbishment: Lessons for lean construction. *IGLC 2016 - 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 23-32.
- Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara Paula. (2000). Tutki ja kirjoita. 6. uudistettu painos. *Helsinki: Tammi*.
- Holweg, M. (2007). The genealogy of lean production. *Journal of operations management*, 25(2), 420-437.
- Hopp, W.J. & Spearman, M.L. (2011). *Factory physics. Waveland Press, Long Grove, Illinois*.
- Horman, M. & Kenley, R. (2005). Quantifying levels of wasted time in construction with meta-analysis. *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE.*, 131, 52-61.
- Horman, M.J., Messner, J.I., Riley, D.R. & Pulaski, M.H. (2003). Using buffers to manage production: A case study of the Pentagon renovation project. In *Proceedings of the 11th annual conference of the International Group for Lean Construction, Blacksburg*.
- Horman, M.J. & Thomas, H.R. (2005). Role of inventory buffers in construction labor performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 834 - 843.
- Howell, G. (1999). What is lean construction-1999. *Proceedings IGLC 1999*, 1-10.
- Howell, G., Ballard, G. & Hall, J. (2001). Capacity utilization and wait time: A primer for construction. *Proceedings of IGLC-9, Singapore, Korea*.
- Kalsaas, B. (2013). Measuring waste and workflow in construction. *21th Annual Conference of the IGLC. Fortaleza, Brazil*, 31-2.

- Kalsaas, B.T., Gundersen, M., Berge, T.O., Koskela, L. & Saurin, T.A. (2014). To measure workflow and waste. A concept for continuous improvement. In *22nd Annual Conference of the IGLC, Oslo, Norway*, 835 - 846.
- Kenley, R. & Seppänen, O. (2010). *Location-Based Management for Construction*. London: Routledge.
- Koskela, L. (2000). An exploration towards a production theory and its application to construction.. *VTT Technical Research Centre of Finland*.
- Koskela, L. (2004). Making-Do — the Eighth Category of Waste. In: *12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 3-5th August 2004, Helsingor, Denmark*.
- Koskela, L., Ballard, G., Howell, G. & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction - Chapter 14. Teoksessa: *Design and Construction: Building in Value*, 211-226.
- Koskela, L., Bølviken, T. & Rooke, J. (2013). Which are the wastes of construction?. In *Proceedings for the 21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction.*, 3-12.
- Koskenvesa, A., Koskela, L., Tolonen, T. & Sahlstedt, S. (2010). Waste and labor productivity in production planning case finnish construction industry. *Challenging Lean Construction Thinking: What Do We Think and What Do We Know? - 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 18*, 477-486.
- Kujansuu, P., Lehtovaara, J., Grönvall, M., Seppänen, O. & Peltokorpi, A. (2019). Comparison of Collaboration and Trade Partner Commitment in Takt Implementation Cases. In *Proceedings of the 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Dublin, Ireland*, 1219 - 1228.
- Lee, S.-H., Diekmann, J., Songer, A. & Brown, H. (1999). Identifying waste: Applications of construction process analysis. *Proceedings of the 9th IGLC Conference. Berkeley, USA*, 63-72.
- Liker, J. (1997). *Becoming lean: Inside stories of US manufacturers.. CRC Press*, 481.
- Loosemore, M. (2014). Improving construction productivity: a subcontractor's perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 21(3), 245 - 260.
- Mossman, A. (2018). What is lean construction: another look. *Proc. 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Chennai, India*, 1240-1250.
- Pasila, H. (2019). *Impact of Lean-Intervention on Productivity*. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Building Technology. Espoo. 73 s.
- Rakennusteollisuus RT ry, (2019). *Kuviopankki*. [Online] <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-Saatavissa>

[suhdanteet/Kuviopankki/](#)
[Haettu 9.8.2019].

Sacks, R. (2016). What constitutes good production flow in construction?. *Construction management and economics*, 34(9), 641-656.

Sacks, R., Seppänen, O., Priven, V. & Savosnick, J. (2017). Construction flow index: a metric of production flow quality in construction. *Construction management and economics*, 35(1-2), 45-63.

Sakamoto, M., Horman, M.J. & Thomas, H.R. (2002). A study of the relationship between buffers and performance in construction. In *Proc. Tenth Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Gramado, Brazil*.

Salem, C., Lefèvre, C., Li, J., Waters, R., Tommelein, I.D., Jayamanne, E. & Shuler, P. (2018). Managing the “receding edge”. *IGLC 2018 - Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Evolving Lean Construction Towards Mature Production Management Across Cultures and Frontiers*, 2018(2), 713-723.

Salerto, S. (2019). Hukan mittaaminen tahtihankkeessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Building Technology. Espoo. 83 s.

Seppänen, O. (2014). A comparison of takt time and LBMS planning methods. In *Proc. 22nd Ann. Conf. of the Int'l Group for Lean Construction, Oslo, Norway*, 727 – 738.

Seppänen, O. & Kankainen, J. (2004). Empirical research on deviations in production and current state of project control. In *Annual Conference of the International Group for Lean Construction* (Vol. 12).

Shingo, S. (1989). A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint. *Japan Management Association*.

Teo, M.M.M. & Loosemore, M. (2001). A theory of waste behaviour in the construction industry. *Construction Management and Economics*, 19(7), 741 - 751.

Tetik, M., Peltokorpi, A., Holmström, J. & Seppänen, O. (2018). Impacts of an assembly kit logistic solution in renovation projects: a multiple case study with camera-based measurement. In *Proc: 25th Annual EurOMA Conference 24-26 June 2018, Budapest, Hungary*.

Tommelein, I.D. (2017). Collaborative takt time planning of non-repetitive work. In *Proceedings of 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Heraklion, Greece*, 745 - 752.

Tommelein, I.D., Riley, D.R. & Howell, G.A. (1999). Parade game: Impact of work flow variability on trade performance. *Journal of construction engineering and management*, 125(5), 304 - 310.

- Trucco, E. & Kaka, A. (2004). A framework for automatic progress assessment on construction sites. *International Journal of IT in Architecture Engineering and Construction*, 2, 147-164.
- Vatne, M. E. & Drevland, F. (2016). Practical Benefits of Using Takt Time Planning: A Case Study. *Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA*, 173–182.
- Vilkka, H. (2005). Tutki ja kehitä. *Jyväskylä: Kustannusosakeyhtiö Tammi*.
- Vilkka, H. (2007). Tutki ja mittaa. *Jyväskylä: Kustannusosakeyhtiö Tammi*.
- Ward, S. & McElwee, A. (2007). Application of the principle of batch size reduction in construction. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-15)*, 15-17.
- Womack, J. P. & Jones, D. T. (1996). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. *Simon & Schuster, New York*.
- Womack, J.P., Jones, D.T. & Roos, D. (1990). The machine that changed the world, *Rawson Associates. New York*, 323.
- Yin, R. K. (2009). *Case Study Research: Design and Methods*, 219.
- Zhao, J., Seppänen, O., Peltokorpi, A., Badihi, B. & Olivieri, H. (2019). Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction. *Automation in Construction*, 104, 52-65
- Østnor, T., Faanes, S. & Lædre, O. (2018). Laminated timber versus on-site cast concrete: a comparative study. In *Proc. 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, González, VA (ed.), Chennai, India, 1302 - 1312.

Liiteluettelo

Liite 1. Havainnointilomake 1. 1 sivu.

Liite 2. Havainnointilomake 2. 1 sivu.

Liite 1. Havainnointilomake 1

HAVAINNOINTILOMAKE 1

Päivä _____

K = Kyllä

$$E = E_i$$

S = Suunnitelmat puuttuu/epäselviä

Ta = Tarvikkeet/materiaalit puuttuu

Työn = Työntekijät puuttuu

Työk = Työkalut/apuvälineet puuttuu

Ti = Tila ei ole käytettävissä/vapaana

Ed = Edeltävät työt ovat tekemättä

U = Ulkoiset olosuhteet eivät salli työntekoa

Tau = Työntekijä tauolla

Teh = Työ on tehty

$$M = M_{uu} \quad s_{yy}$$

Ei = Ei tiedossa/syytä ei saatu selville

Huone 5

[illegible]

Huone 6

[illegible]

Liite 2. Havainnointilomake 2

HAVAINNOINTILOMAKE 2

Päivä _____

Palaveri: _____

Paikalla olleet urakoitsijat ja asema yrityksessä:

Ollaanko aikataulussa tahtiaikataulun osalta, jos ei mikä on syynä:

Muu huomioit:
